

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

На правах рукопису

СТРЕЛЬЦОВА ІННА МИКОЛАЇВНА

УДК 622.23.05

**ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОЄМНОСТІ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД
МАГНІТНО-ГІДРОКАВІТАЦІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

Спеціальність 05.15.09 – Геотехнічна і гірнича механіка

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
Терентьев Олег Маркович
доктор технічних наук, професор

Київ – 2016

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАУКОВИХ ТА ПРАКТИЧНИХ ДОСЯГНЕНЬ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	12
1.1 Використання теорії графів для аналізу способів руйнування гірських порід.....	12
1.2 Обґрунтування вибору комбінованого обертово-гідрокавітаційного способу руйнування гірських порід з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку.....	20
1.3 Аналіз критеріїв руйнування гірських порід.....	22
1.4 Аналіз математичних моделей питомої поверхневої енергії.....	27
Висновки	32
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ МЕТОДИКИ ТА ПРОГРАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	34
2.1 Планування аналітичних та експериментальних досліджень.....	34
2.2 Схема експериментального стенду досліджень зміни питомої поверхневої енергії гірських порід під дією гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку.....	38
2.3 Програма проведення експериментальних досліджень.....	43
2.4 Методика статистичного аналізу	47
Висновки	51
РОЗДІЛ 3 ОБґРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ, ВІД ЯКИХ ЗАЛЕЖИТЬ ПИТОМА ПОВЕРХНЕВА ЕНЕРГІЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ РУЙНУВАННІ.....	52
3.1 Базові параметри що визначають питому поверхневу енергію.....	52
3.2 Енергоємність руйнування гірських порід.....	62
3.3 Геометричні та частотні параметри кавітаційної зони.....	68

Висновки	71
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТОМОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ РУЙНУВАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД З ГІДРОКАВІТАЦІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ З МАГНІТНО- ІНДУКЦІЙНИМ ФОКУСУВАННЯМ КАВІТАЦІЙНОГО ПОТОКУ	72
4.1 Вибір і підготовка зразків гірських порід.....	72
4.2 Створення експериментального стенду.....	75
4.3 Перевірка умови виникнення кавітації.....	77
4.4 Вплив гідрокавітаційного навантаження на модуль пружності I роду гірських порід	79
4.5 Виникнення локальних дефектів зразків гірських порід до та після ослаблення гідрокавітаційним навантаженням	87
4.6 Зміна питомої поверхневої енергії під дією гідрокавітаційного навантаження	93
4.7 Зміна питомої енергоємності руйнування при зменшенні питомої поверхневої енергії при гідрокавітаційному навантаженні	96
4.8 Рівняння регресії питомої поверхневої енергії.....	100
Висновки	102
РОЗДІЛ 5 ПРОМИСЛОВА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБЕРТОВО-ГІДРОКАВІТАЦІЙНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД З МАГНІТНО-ІНДУКЦІЙНИМ ФОКУСУВАННЯМ КАВІТАЦІЙНОГО ПОТОКУ.....	104
5.1 Умови промислової реалізації обертово-гідрокавітаційного руйнування гірських порід.....	104
5.2 Енергоємність руйнування при традиційному обертовому руйнуванні та обертово-гідрокавітаційному.....	108
5.3 Економічна ефективність промислового впровадження обертово- гідрокавітаційного руйнування гірських порід.....	112
5.4 Правила техніки безпеки та експлуатації при руйнуванні гірських порід різцем кавітаційним.....	115

Висновки	116
Загальні висновки.....	118
Перелік посилань.....	120
Додаток А Енергоємність різних способів руйнування гірських порід.....	136
Додаток Б Магнітомір НТ20.....	137
Додаток В Наноіндентометр «Мікрон Гамма».....	138
Додаток Г Рентгеноструктурний дифрактометр «Regaku Ultima IV».....	139
Додаток Е Результати хімічного аналізу обраних видів зразків гірських порід.....	140
Додаток Ж Результати досліджень модуля пружності гірських порід до та після гідрокавітаційної обробки з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку.....	145
Додаток К Пристрій для виміру швидкості ультразвукових хвиль УИСУ-01.....	154
Додаток Л Лістинг програми MathCAD з методикою визначення коефіцієнтів рівняння регресії.....	153
Додаток М Акт впровадження на Товкачівському гірничозбагачувальному комбінаті.....	155
Додаток Н Сертифікати та дипломи участі у конференціях та конкурсах за темою дисертації.....	156

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ГОСТ – государственный стандарт.
ДСТУ – державний стандарт України.

Ефект Векслера – Макмілана – якщо вектор швидкості частинки V з зарядом q та масою m утворює прямий кут з лініями вектору магнітної індукції B , то траєкторією частинки є окружність R , по якій частинка обертається з періодом, що не залежить від швидкості V .

Ефект Рейса – полягає у електризації і подальшому переміщенні зважених у рідині твердих частинок, бульбашок газу, краплин іншої рідини або колоїдних частинок під дією електромагнітного поля.

Ефект Річардсона – Де Гааза – Ейнштейна – магнітомеханічний ефект, який полягає у тому, що тіло при намагнічуванні вздовж деякої осі набуває відносно неї обертовий імпульс, пропорційний набутій намагніченості.

Ларморова прецесія – прецесія магнітного моменту частинок матеріалу навколо вектору зовнішнього магнітного поля.

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

ППЕ – питома поверхнева енергія.

Прецесія – рух вектора моменту імпульсу навколо певної осі.

ТУ – технічні умови.

УДК – універсальний десятиковий класифікатор.

Фокусування кавітаційної зони – процес зменшення радіуса кавітаційної зони навколо певної осі.

Частота ларморової прецесії – кутова частота прецесії магнітного моменту, що знаходиться у магнітному полі.

ВСТУП

Актуальність теми. Руйнуванням гірських порід, удосконаленням старих і розробкою нових способів займалися: В. В. Бойко, В. І. Бондаренко, В. І. Брилін, В. Л. Бритаєв, О. О. Вовк, В. Д. Воробйов, Ю. В. Горюнов, С. М. Журков, В. Г. Кравець, Ф. І. Кучерявий, В. З. Партон, Н. С. Ремез, О. О. Скочинський, О. М. Терпигорьєв, Л. Д. Шевяков, Є. І. Шемякін та інші. На сьогодні основним серед способів відділення гірської породи з масиву є вибуховий. Одним із аспектів, від якого залежить ефективність руйнування гірської породи даним способом є етап підготовки масиву до вибуху. Він передбачає створення і заряджання вибухівкою шпурів та свердловин. На даний час у вітчизняній гірничій промисловості використовують способи руйнування, що мають високу питому енергоємність в декілька тисяч МДж/м³: гідравлічний, електротермічний, плазмовий, термошаршковий тощо. Способи руйнування, що забезпечують меншу енергоємність, також мають ряд недоліків, а саме: використання механічного – обмежене міцністю порід до 6 за шкалою Протодьяконова, вибухового – супроводжується утворенням сейсмічних хвиль, забрудненням довкілля. То ж, задача розробки енергозберігаючих способів і обладнання для руйнування гірських порід залишається актуальною.

Аналіз теорій руйнування гірських порід Бонда, Гілмана, Грифітса, Ірвіна, Кірпічова, Орована, Ребіндера, Ретінгера та інших показав, що вони базуються на механіці суцільних середовищ та не враховують молекулярну будову гірської породи. Наявність вказаних недоліків призводить до збільшення енерговитрат і зниження коефіцієнту корисної дії.

Створення нового математичного апарату та його практична апробація, дозволяє врахувати технологічні та фізико-механічні показники руйнування гірських порід. Для цього необхідно розглянути сукупну дію внутрішніх та зовнішніх навантажень на молекулярному рівні. Це є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі електромеханічного обладнання енергоємних виробництв відповідно до плану наукових досліджень кафедри і є складовою частиною НДР: «Удосконалення електромеханічних систем геотехнічних виробництв» Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту» (№ ДР 0113U007402), у якій автор брала участь, як виконавець.

Метою роботи є зниження енергоємності руйнування гірських порід зміною їх питомої поверхневої енергії при обертово-гідрокавітаційному навантаженні з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку.

Для досягнення мети поставлені наступні **завдання**:

1. Отримати залежності зміни питомої поверхневої енергії гірських порід від магнітної індукції та геометрії дифузора кавітатора.
2. Встановити залежності зміни енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії гірських порід.
3. Визначити залежності зміни енергоємності процесу руйнування при обертово-гідрокавітаційному навантаженні з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку від магнітної індукції у дифузори кавітатора.
4. Обґрунтувати режим гідрокавітаційного навантаження гірських порід з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку.

Об'єкт дослідження – процес розміцнення гірських порід гідрокавітаційним навантаженням з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку.

Предмет дослідження – залежності зміни питомої поверхневої енергії та енергоємності руйнування гірських порід від магнітної індукції та довжини дифузору кавітатора при гідрокавітаційному навантаженні з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку.

Методи дослідження. При виконанні роботи використані наступні методи: *аналітичний* – для встановлення залежностей та закономірностей енергоємності руйнування гірських порід від питомої поверхневої енергії при

обертово-гідрокавітаційному навантаженні з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку; *математичного моделювання* – для складання моделей енергоємності руйнування поверхневої енергії гірських порід від виробничих умов видобутку корисних копалин та геометричних параметрів кавітатора різця кавітаційного; *планування експерименту* – для обрання і обґрунтування необхідної і достатньої кількості дослідів та параметрів, що впливають на питому поверхневу енергію гірських порід; *експериментальної апробації* – для перевірки теоретичних положень роботи в лабораторних і виробничих умовах; *техніко* – економічного аналізу – для оцінки доцільності практичної реалізації отриманих результатів.

Наукова новизна представлена у вигляді наукових положень і полягає у тому, що вперше:

1. Отримано залежності питомої поверхневої енергії руйнування гірських порід: спадно-зростаюча від магнітної індукції в діапазоні від 15 мТл до 45 мТл та спадна від довжини дифузору кавітатора робочого інструменту від 10 мм до 50 мм та куті його розкриття 60^0 .

2. Встановлено залежність енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії при обертово-гідрокавітаційному навантаженні з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку, яка спадає за логарифмічним законом: для гнейсу з $61 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ до $57 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ та для граніту з $73 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ до $68 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ при зниженні питомої поверхневої енергії гнейсу з $43,0 \text{ Дж} / \text{м}^2$ до $39,5 \text{ Дж} / \text{м}^2$ та граніту з $52,4 \text{ Дж} / \text{м}^2$ до $48,7 \text{ Дж} / \text{м}^2$.

3. Визначено, що при обертово-гідрокавітаційному навантаженні з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку питома енергоємність змінюється за поліноміальним законом при зміні магнітної індукції в діапазоні (0...45) мТл. При цьому спостерігається зниження енергоємності руйнування пружно-крихких гірських порід на 11 % при магнітній індукції 15 мТл.

4. Обґрунтовано режим гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку для забезпечення зростання

кількості локальних дефектів для пружно-крихких порід до 20 одиниць на 1 мм^2 , з середньою довжиною, шириною і глибиною відповідно 100, 10 і 5 мкм при магнітній індукції 15 мТл, куті розкриття дифузора 60° з довжиною 30 мм.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

– розроблено обертово-гідрокавітаційний спосіб руйнування гірських порід з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку та інструмент для його реалізації, захищений патентом України UA №101946 МПК E21B 7/18. Використання запропонованого способу і інструменту в умовах Товкачівського гірничо-збагачувального комбінату забезпечило зниження енергоємності руйнування пружно-крихких гірських порід на 11 %;

– встановлено рекомендації щодо значень параметрів руйнування гірських порід обертово-гідрокавітаційним навантаженням з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку: магнітна індукція 15 мТл, довжина дифузору кавітатора робочого інструменту 30 мм та кут розкриття 60° .

Досліджене у дисертації фокусування кавітаційного потоку за допомогою постійного магнітного поля дозволило забезпечити захист робочого інструменту від дії кавітації.

Основні положення дисертаційної роботи використані у навчальному процесі при викладанні дисципліни «Техніка і технологія переробки гірських порід» для студентів гірничих спеціальностей Інституту енергозбереження та енергоменджменту НТУУ «КПІ».

Особистий внесок здобувача у роботах опублікованих у співавторстві: [1] – аналіз існуючих математичних моделей питомої поверхневої енергії; [2] – створення класифікаційних графів способів руйнування гірських порід; [3] – створення схеми експериментального стенду для дослідження зміни питомої поверхневої енергії гірських порід при руйнуванні обертово-гідрокавітаційним способом з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку та визначення необхідної кількості дослідів; [4] – експериментальне дослідження зони передруйнування, створеної гідрокавітаційним навантаженням з магнітно-

індукційним фокусуванням кавітаційного потоку; [5] – експериментальне дослідження міцнісних параметрів гірських порід після їх обробки гідрокавітаційним навантаженням з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку; [6] – створення математичної моделі енергоємності руйнування гірських порід в залежності від питомої поверхневої енергії; [7] – створення конструкції різця кавітаційного; [8] – створення математичного апарату для визначення довжини кавітаційної зони при обертово-гідрокавітаційному способі руйнування гірських порід; [9] – обґрунтування обраних параметрів управління питомою поверхневою енергією при руйнуванні гірських порід; [10] – створення математичної моделі питомої поверхневої енергії; [11] – обґрунтування доцільності використання додаткового гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку при руйнуванні гірських порід; [12] – опис фізичної суті явища прецесування кавітаційного потоку під дією магнітного поля; [13] – обґрунтування актуальності створення нового енергозберігаючого способу руйнування гірських порід; [14] – проведення аналізу критеріїв руйнування Ірвіна, Орована, Грифітса та інших.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення дисертації доповідались на Міжнародних науково-практичних конференціях: «Енергетика. Екологія. Человек. Перспективы развития горного дела и подземного строительства» (м. Київ, НТУУ «КПІ», 23 – 24 травня 2013 р., 27-29 травня 2015 р.); «Theoretical & Applied Science» (Сербія, Неопланта 30.12.2013; Швеція, Лінкопінг 28.02.2014); «Сталий енергетичний розвиток: сучасні тенденції, технології та рішення» (м. Київ 24.09.14); II Аспірантські читання 2014 пам'яті А. В. Праховника (м. Київ, НТУУ «КПІ», 16-17 квітня 2014 р.) та на Міжнародному форумі-конкурсі молодих вчених «Проблеми надрокористування». (Санкт-Петербург, Росія, Національний мінерально-сировинний університет «Гірничий», 24 – 26 квітня 2013 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 14 наукових праць, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях України, 5 з яких включені

до міжнародних наукометричних баз, 1 патент на корисну модель, 7 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків, списку використаних літературних джерел, який містить 158 найменувань. Основний текст викладено на 119 сторінках друкованого тексту, містить 29 рисунків, 16 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАУКОВИХ ТА ПРАКТИЧНИХ ДОСЯГНЕНЬ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

1.1 Використання теорії графів для аналізу способів руйнування гірських порід

Способи руйнування гірських порід поділяються на: механічні, гідравлічні, вибухові, фізичні та хімічні [1].

Механічний спосіб використовується на 85 % усіх гірських і земляних робіт [2]. Поділяється на ударний та обертовий. Серед комбінованих механічних способів виділяють ударно-обертовий та обертово-ударний. Витрати енергії на одиницю об'єму знаходяться в межах $(0,7 \dots 6,1)$ МДж/м³ [3]. Недоліком способу є обмежена область його ефективної роботи – для порід з коефіцієнтом міцності за шкалою проф. Протодьяконова до 6. Для порід з більшим коефіцієнтом міцності необхідна заміна матеріалу інструменту зі сталі на алмаз, боразон тощо [4].

Гідравлічний спосіб руйнування порід передбачає використання напірного струменю води при тисках від кількох одиниць МПа до декількох сотень МПа [5] (гідромоніторний). Для підвищення ефективності руйнування порід у струмінь води додають $(5 \dots 15)$ % абразивних часток – сталевий дріб, кварцовий пісок, тощо (гідроерозійний). За характером струменю виділяють імпульсний та безперервний. Цей спосіб застосовують при руйнуванні вертикально розміщених, по відношенню до горизонту, масивів гірських порід. Енергоємність гідравлічного способу руйнування знаходиться в межах $(1000 \dots 2000)$ МДж/м³ [3].

Вибуховий спосіб руйнування оснований на процесі фізичного або хімічного перетворення вибухової речовини. Супроводжується переходом

потенціальної енергії в кінетичну з різким підвищенням тиску в оточуючому середовищі, виникненням ударної хвилі та поля напружень [4].

Переваги:

- швидкий перебіг процесу руйнування (наприклад, по заряду з 1 кг гексогену, об'єм якого $0,6 \text{ дм}^3$, а теплота вибуху $5,4 \text{ МДж/кг}$, час детонації – $1 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, що відповідає потужності 500 кВт [6]).

Недоліки:

- сейсмічна дія вибуху на законтурний масив, його порушення і ослаблення;
- забруднення довкілля, у результаті вибуху;
- витрати на додаткову обробку поверхонь монолітних блоків;
- утворення газоподібних речовин обсяг яких у $(2000 \dots 4000)$ разів перевищує обсяг заряду вибухової речовини [7].

Енергоємність вибухового способу руйнування знаходиться в межах $(200 \dots 950) \text{ МДж/м}^3$ [3].

Фізичні способи руйнування гірських порід: термічні, електричні, ультразвукові.

До термічних способів руйнування порід відносяться: вогневий, плазмовий, атомний, циклічний, лазерний, електронно-променевий. Енергія теплового потоку перетворюється гірською породою в механічну роботу, яка викликає руйнування породи. До електричних способів руйнування порід відносяться: електродуговий, електронагрівальний, електроіндукційний. Енергія електромагнітного та електричного полів перетворюється в гірській породі спочатку в теплову, а потім у механічну роботу.

Перевагами фізичних способів руйнування порід є те, що в них відсутній породоруйнуючий інструмент. Це важливо при підвищенні міцності руйнування порід у зв'язку з різким зниженням стійкості інструменту і збільшенням можливості його зносу.

Високочастотним способом руйнування гірських порід є резонансний на основі використання надвисоких частот – випромінювання. Їх діапазон

знаходиться в межах $(3 \cdot 10^2 \dots 3 \cdot 10^5)$ МГц. При цьому довжини хвиль у повітрі, відповідно, змінюються в межах $(1 \dots 0,001)$ м [7]. При застосуванні даного способу руйнування в масив вводиться електромагнітна хвиля. З протилежного боку, перпендикулярно до напрямку дії випромінювача, ставиться екран. У результаті, пряма та відбита хвилі накладаються і утворюється резонанс. Енергоємність руйнування $(3 - 7)$ МДж/м³, продуктивність 30 м³/год [7]. Даний спосіб руйнування доцільно використовувати для діелектричних порід, наприклад, граніт або вапняк. Недоліком є те, що максимальна товщина шару масиву, що руйнується 0,5 м.

Електротермічний високочастотний спосіб передбачає нагрів масиву під дією електромагнітного поля. При цьому виникають зони теплового розширення в яких з'являються розтягуючі напруження. Це призводить до появи тріщин. Електромагнітна установка генерує поле частотою 5,28; 13,56; 27,12 МГц [7], дозволених для промислового застосування. Дані частоти достатні для руйнування тіла таких діелектричних порід, як граніт, вапняк, сієніт, гнейс. Енергоємність руйнування $(7 \dots 13)$ МДж/м³, продуктивність знаходиться в межах від 25 до 50 м³/год [7].

Електроімпульсний спосіб (електровибух) полягає у короткочасній (1 мс) розрядно-імпульсній дії у рідині, що знаходиться в масиві. У результаті, викликає появу механічних руйнуючих напружень [7].

Переваги електроімпульсного способу: відсутність пило-газоутворення, відсутність розльоту шматків оброблюваного масиву, можливість руйнування заданих обсягів в локальній площині, що зменшує втрати сировини при обробці. Енергоємність руйнування $(100 \dots 200)$ МДж/м³ [3].

Хімічний спосіб руйнування. При руйнуванні гірської породи хімічним способом використовується спеціальна суміш – терміт. Руйнування гірських порід відбувається в результаті нагрівання породи при згорянні терміта на поверхні породи або в шпурі, пробуреного на глибину $(0,1 \dots 0,4)$ м. Витрата терміту при руйнуванні міцних порід становить $(0,8 \dots 1,2)$ кг на 1 м² новоствореної поверхні [3]. Відбір проб даним способом здійснюється з

використанням вже існуючих тріщин або шпурів, в які засипається порошок або закладаються брикети. За експериментальними даними температура горіння терміта досягає (2773...3273) К на 1 кг речовини [3]. Перевагою застосування терміту, в порівнянні з вибуховим способом, є зниження собівартості руйнування гірських порід на (30...40) % [3].

Крім терміту серед хімічних речовин використовують поверхнево-активні речовини (ПАР). Використання ПАР у якості промивної рідини дозволяє підвищити швидкість буріння на (20...50) %, знизити зношування та затуплення бурового інструменту у (1,5...2,2) рази та зменшити запиленість шахтної атмосфери у (2,0...3,7) рази [8].

Недоліком хімічного способу руйнування порід є екологічна небезпека забруднення середовища.

Комбіновані способи руйнування порід.

Гідромеханічний спосіб руйнування – поєднує дію робочого органу та напірного струменю промивної рідини. Технічна база для втілення гідромеханічного способу розвинута провідними світовими виробниками: «Флоу Індастріз», «Кеннаметал» (США), «Андерсон Стратклайд», «Доско» (Великобританія), «Тайсей» (Японія), «Вірт» (Германія).

Перевагами гідромеханічного способу руйнування є [6]:

- розширення області застосування механізмів, на яких встановлені гідромеханічні робочі органи для руйнування порід з межею міцності на стиснення $\sigma_{ст}$ (160,0...235,0) МПа;
- зниження зусиль різання на (40...60) % і подачі на (60...70) %;
- зменшення крутного моменту приводу і споживаної потужності на робочому органі в (1,3...2,2) рази;
- підвищення швидкості проходки в (1,5...5,0) разів без збільшення потужності двигуна виконавчого органу;
- зменшення витрат механічного інструменту в (2...6) разів;

- збільшення продуктивності в (1,7...2,2) рази при роботі з міцними породами (більше 6 за шкалою Протодьяконова) зі збереженням маси і габаритів бурової установки;

- зменшення пилоутворення на (70...85) % та іскроутворення на (90...100) % ;

Недоліки гідромеханічного способу руйнування [6]:

- використання струменю води з тиском до 400,0 МПа та витратою (3...6) $\text{дм}^3/\text{хв.}$ на один різець. Базова машина повинна бути оснащена джерелом води високого тиску (не нижче 100,0 МПа) і витратою (5...10) $\text{м}^3/\text{год.}$ Потужність такого насоса дорівнює потужності привода виконавчого органа, а часто і перевищує її;

- зниження стійкості насадки зі збільшенням початкового тиску. При тиску в (70,0...80,0) МПа твердосплавна насадка служить до 200 год, а при тиску в 350,0 МПа - всього (3...4) год;

- труднощі каналізації води та підведення її до робочого органу та різців;

- відсутність серійного випуску рукавів та арматури на робочий тиск понад 200,0 МПа;

- залежність стійкості обертових ущільнень (гідрознімачів) від тиску води. Наприклад, при тиску 70,0 МПа досягнута стійкість на протязі 400 год, а при тиску 350,0 МПа – 2 год.

Застосовують також такі комбіновані фізичні способи руйнування: плазмо-вогневий, електроімпульсний, електротермічний.

Хімічно – механічний спосіб руйнування порід оснований на використанні хімічно активних речовин. Такими речовинами є лужні метали, які вступають у реакцію з водою, що присутня в масиві у вільній або кристалогідратній формі. Хімічна дія застосовується для підвищення ефекту руйнування механічними джерелами руйнування.

У результаті досліджень комбінації різних способів руйнування, їх систематизовано орієнтованими графами з десятьма вершинами: механічний ударний, механічний обертовий, гідравлічний безперервний, гідравлічний

імпульсний, електричний, термічний, ультразвуковий, надвисокочастотний, хімічний та вибуховий (рис. 1,1). Для систематизації використано методику [9].

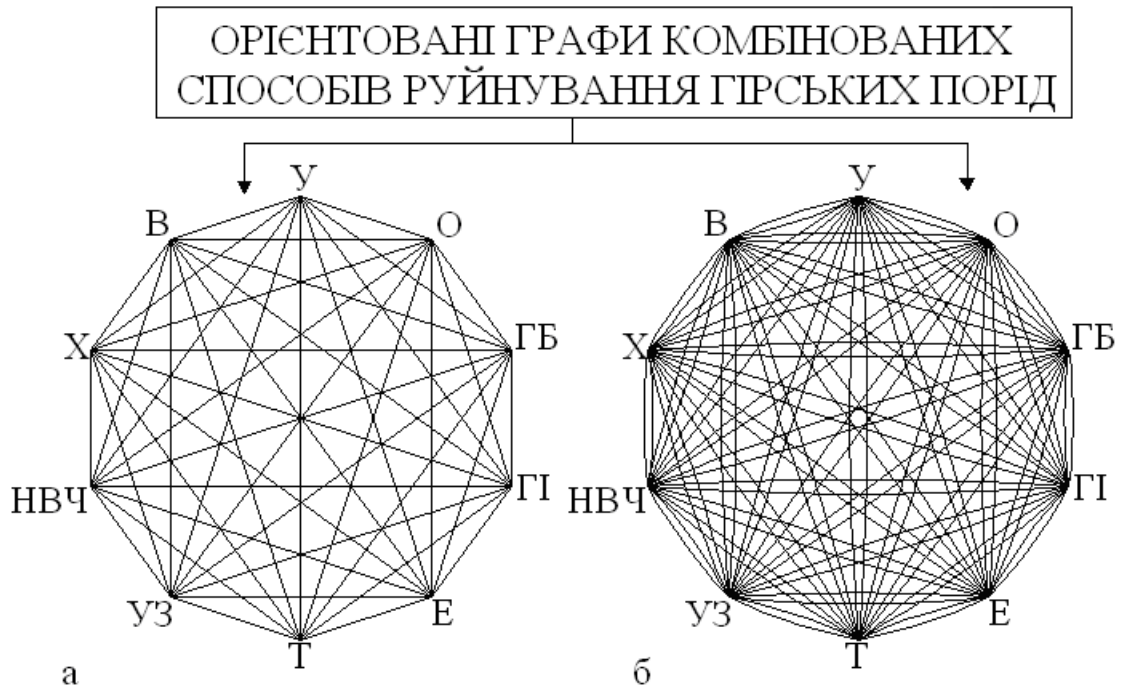


Рисунок 1.1 – Орієнтовані графи комбінованих способів руйнування гірських порід за видом навантаження на гірську породу (У – ударні, О – обертові, ГБ – гідравлічні безперервні, ГІ – гідравлічні імпульсні, Е – електричні, Т – термічні, УЗ – ультразвукові, НВЧ – надвисокочастотні, Х – хімічні, В – вибухові).

Граф з не строго паралельними дугами (ГЗНПД – рис. 1а) відповідає комбінованим способам, для яких не важлива послідовність прикладення навантаження. У графі зі строго паралельними дугами (ГЗСПД – рис. 1.1 б) важлива послідовність прикладення навантаження. З ГЗНПД отримано комбінацій: 72 парних (представлені відрізками) та 576 потрійних способів навантаження (представлені трикутниками). З ГЗСПД отримано комбінацій: 144 парних (півдуга між двома вершинами) та 5184 потрійних навантажень (три півдуги з'єднаних трьома вершинами).

Порівняльний аналіз значень енергоємностей найбільш поширених одиничних та комбінованих способів руйнування гірських порід вказані у табл. 1 та у додатку А.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз значень енергоємностей одиничних та комбінованих способів руйнування гірських порід

Одиничний спосіб навантаження	Середня енергоємність руйнування [2], МДж/м ³	Комбінований спосіб навантаження	Середня енергоємність руйнування [2], МДж/м ³
1.Ударний	420	Ударно-обертовий	500
2.Обертовий	750		
3.Гідравлічний	1500	Гідроімппульсний	100
		Електрогідравлічний	450
4.Електротермічний	5000	Електроімппульсний	150
		Електротермомеханічний	650
		Термомеханічний	1400

З аналізу даних табл. 1.1, енергоємність руйнування гірських порід знижується за рахунок застосування комбінованого навантаження: для ударного та обертового способів біля 33 %, для гідравлічного – від 70 до 93 %, для електротермічного від 72 до 97 %. Зниження енергоємності руйнування виникає:

- в ударно-обертовому способі через те, що окрім стиснення гірської породи має місце зсув. Тобто, крім осьових деформацій на породу діють ще й обертові;

- у гідроімппульсному, електрогідравлічному та електроімппульсному способах за рахунок появи деформаційних хвиль у породі. Через їх імпульсний характер наступна випущена хвиля наздоганяє попередню і виникає субрезонансний режим по принципу ефекту Допплера [10]. Це створює частотне навантаження на масив, якого не достатньо для руйнування молекулярних зв'язків, а лише для їх ослаблення.

- у електротермомеханічному та термомеханічному способах внаслідок зростання локальних напружень міжатомних зв'язків. Це пов'язано з кінетичною теорією пружності [11], за якою тепловий рух молекул є одним із основних чинників, що обумовлюють процес руйнування порід. Фізично це відбувається наступним чином: при термічній дії зростання частоти коливального руху молекул продовжується до тих пір, поки навантаження

молекулярних зв'язків не наближається до значення межі міцності на розрив. Після цього виникають тріщини і порода руйнується.

Промислове впровадження нового комбінованого механіко-гідрокавітаційного способу не потребує додаткових витрат енергії і забезпечує зниження питомої енергоємності руйнування гірських порід. Реалізація відбувається завдяки зміні геометричних параметрів робочого інструменту. Спосіб дозволяє активізувати енергетичний потенціал потоку промивної рідини при кавітації. За рахунок енергії схлопування кавітаційних бульбашок, відбувається створення штучної тріщинуватості та ініціювання поширення природної. У сукупності вони формують зону передруйнування. Важливість створення зони передруйнування при видобутку гірських порід описана у дослідженнях Г. І. Баренблатта, Д. Броека, А. Гриффітса, А. Ф., Іоффе М. Я. Леонова, В. В. Панасюка та інших. А. Гриффітс дійшов висновку, що міцність крихких твердих тіл обумовлена міцністю на розрив їх структурних зв'язків. Останні ослаблені за рахунок поверхневих мікротріщин. Це підтверджено експериментальними дослідженнями А. Ф. Іоффе [12], який розчинив верхній шар кам'яної солі, що містив мікротріщини. Після цього виміряв міцність на розрив і отримав значення наближені до теоретичної міцності.

Згідно з дослідженнями Я. М. Фем'яка [13], при суто механічному руйнуванні гірської породи на утворення тріщин витрачається (8...12) % загальної енергії. Для завершення формування тріщини з досягненням їх кінцевих глибин – (10...12) %, для сколювання – (6...8) %. Решта – (68...72) % витрачаються на роздавлення гірської породи, пружну деформацію, тертя тощо. При механіко-гідрокавітаційному руйнуванні гірських порід на утворення нових – технологічних тріщин і розвиток природніх направлена енергія кавітаційного потоку. Це сприяє зниженню загальних енергетичних витрат майже до 24 %.

На сьогодні вже проводились промислові випробування обладнання для реалізації механіко-гідрокавітаційного способу руйнування гірських порід. Так, наприклад, при використанні гідродинамічного кавітаційного генератора на

Узинському УБР об'єднання «Мангішлакнефть» (Кзахстан) на турбобурі ЗТСШ-195 вдалось досягти зменшення часу буріння в середньому на 24 % та збільшити швидкість буріння на 30 % [14]. У США фірмою «Mobile Research and Development» проведено повномасштабні дослідження руйнування гірських порід за рахунок кавітаційних явищ від звукових коливань. У результаті обґрунтовано кавітаційний спосіб буріння [15]. Також фірмою «Hydronautics and National Lead Hycalog» успішно проведено дослідження по створенню гідродинамічного кавітатора, що обумовлює схлопування кавітаційних бульбашок у декілька етапів з можливістю подовжити час перебігу кавітаційного процесу [16]. Проте, при розміщенні кавітаційного генератора всередині інструменту, вектор руху кавітаційних бульбашок направлений на ріжучі кромки. Це спричиняє їх руйнування. На основі теореми Лармора зроблено висновок, що під дією постійного магнітного поля кавітаційні каверни фокусуються навколо осі потоку промивної рідини. Це запобігає руйнуванню інструменту від кавітації та створює імпульсне навантаження на масив.

На основі цього запропоновано новий комбінований енергозберігаючий обертово-гідрокавітаційний спосіб руйнування гірських порід з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку (далі – МІФКП) для зниження енергоємності руйнування, що відповідає відрізку О-ГБ на рис. 1.1 а. Звідси виникає завдання дослідити залежність зміни енергоємності процесу руйнування при гідрокавітаційному навантаженні з МІФКП від магнітної індукції у дифузорі кавітатора. Та на основі цього обґрунтувати робочий режим руйнування гірських порід.

1.2 Обґрунтування вибору комбінованого обертово - гідрокавітаційного способу руйнування гірських порід з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку

Кавітаційні бульбашки утворюються в рідині при розтягуючому напруженні близько 27,5 МПа [17]. Їх об'ємна концентрація знаходиться в

межах $(1 \dots 10^{10}) \text{ 1/м}^3$ [18]. При зхлопуванні кавітаційних бульбашок виникають імпульси тиску, що досягають 10^3 МПа [18]. При таких значеннях концентрації та тисків питома потужність кавітаційного потоку рідини складає $(10^4 \dots 10^5) \text{ кВт/м}^3$. Така потужність є додатковим альтернативним джерелом енергії при руйнуванні гірських порід. За рахунок його використання знижується енергоємність руйнування.

Однією з умов виникнення кавітації є наявність у ній домішок у вигляді найдрібніших твердих часточок, навколо яких утворюються кавітаційні бульбашки [19]. Такими домішками є іони натрію, калію, заліза, хлору тощо. При протіканні води через кавітатор утворюється зона зниженого тиску, у якій виникають гідродинамічні коливання. Це призводить до виникнення передзародкових місцевих скупчень газу або стійких зародків бульбашок навколо іонів розчинених у воді речовин. І, як результат, – кавітації. При потраплянні іонів води у постійне магнітне поле \vec{B} вони починають прецесувати разом з кавітаційними бульбашками. Частота прецесування визначається з теореми Лармора [20]. Проте прецесійний рух заряджених частинок не може продовжуватись постійно. Наявність гальмуючих сил призводить до того, що енергія прецесуючого магнітного моменту згасає і кут прецесування Ψ зменшується за експоненціальним законом [21]. При накладенні на іонні домішки змінного магнітного поля \vec{b} кругової поляризації, перпендикулярного постійному \vec{B} , втрати енергії відновлюються за рахунок \vec{b} . При цьому кут Ψ змінюється за резонансним характером при співпадинні частот поля \vec{b} та прецесування Ω (1.1) [20]. Це явище феромагнітного резонансу ларморової прецесії передбачено ще у 1935 році фізиками Л. Д. Ландау та Є. М. Лівшицем. Експериментально підтверджено А. А. Гриффітсом в 1946 році.

Частота прецесії кавітаційного потоку Ω , Гц [20]:

$$\Omega = \zeta \cdot B, \text{ Гц}, \quad (1.1)$$

де ς – гіромагнітне відношення, А·с/кг;

B – індукція магнітного поля, Тл.

Гіромагнітне відношення являє собою відношення магнітного до механічного моменту частки [20, 22], А·с/кг:

$$\varsigma = g \cdot \frac{e}{2 \cdot m_e} = g \cdot \frac{\mu_B}{\hbar}, \quad (1.2)$$

де g – чинник, в.о.;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ – заряд електрона, Кл [20];

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ – маса електрона, кг [20];

$\mu_B = 927,4 \cdot 10^{-26}$ – магнетон Бора, Дж/Тл [20];

$\hbar = 6,626 \cdot 10^{-34}$ – постійна Планка, Дж·с [20].

За умови виходу пікової точки кавітаційної зони за межі різця, створюється зона передруйнування. При цьому кавітаційний потік передає імпульсне навантаження субрезонансних частот на масив гірських порід. Починається зростання природної та утворення штучної тріщинуватості. Мікротріщини «зливаються» у магістральну. Напрямок магістральної тріщини визначається вектором кавітаційного потоку, який є джерелом енергії для її зростання і сприяє постійному руху. Положення пікової точки та форма кавітаційної каверни залежить від геометричних параметрів дифузору, положення магнітів у корпусі різця та значення їх індукції. Отже, додатковою функцією магнітного поля при руйнуванні гірських порід є забезпечення виходу пікової точки сфокусованого кавітаційного потоку за межі зубів різця.

1.3 Аналіз критеріїв руйнування гірських порід

Перші математичні моделі для вирішення різноманітних задач теорії руйнування представлені у роботах А. Гриффітса, С. Н. Журкова, Г. Ірвіна, Ш. Кулона, Т. Мора, В. Новацького, Е. Орована, В. В. Панасюка, Л. Прандтля,

Д. Райса, А. Сен-Венана, А. Е. Треска, А. А. Фрідмана, Є. І. Шемякіна, А. Шлейхера [1, 3, 4, 22 – 30] та інших. Запропоновані цими вченими моделі побудовані на методах механіки суцільних середовищ дозволяють урахувати енергетичні та міцнісні параметри руйнування. Проте, оминають аспекти молекулярної будови порід та зміну їх характеристик при зміні умов середовища. У результаті, знижується точність опису поведінки масивів гірських порід при руйнуванні. У докритичному стані, при нерівномірному розподілі навантажень, в зернистих породах розвивається мікротріщинуватість. Це пов'язано з наявністю площин дислокацій. Тому, удосконалення згаданих вище моделей необхідно проводити на основі механіки дискретних середовищ, з урахуванням новітніх досягнень теорії крихкого руйнування та теорії дислокацій.

Дослідження механіки руйнування твердих тіл розпочато у роботах А. Гриффітса (початок XX ст.). У його роботі [22] вперше процес руйнування пов'язаний не з константами матеріалу, а з довжиною тріщини. А. Гриффітс проводив дослідження для пластини одиничної товщини. Висунув гіпотезу, що тріщина у твердому тілі розвивається під навантаженням за умови, що швидкість вивільнення потенційної енергії деформації більша за приріст питомої поверхневої енергії (ППЕ) тіла:

$$\left| \frac{\partial W}{\partial l} \right| \geq \frac{\partial U}{\partial l}, \quad (1.3)$$

де W – потенційна енергія деформації пластини, Дж;

l – півдовжина тріщини, м;

U – поверхнева енергія тріщини (для пластини одиничної товщини), Дж/м.

Критична довжина тріщини (критерій руйнування А. Гриффітса) K_{gr} , м [31, 32]:

$$2 \cdot l \geq K_{Ip} = 2 \cdot \gamma \cdot E / \sigma^2, \quad (1.4)$$

де γ – ППЕ, Дж/м²;

E – модуль пружності I роду, Па;

σ – напруження розтягу, Па.

З аналізу (1.1) витікає, що основними параметрами, які впливають на процес руйнування твердого тіла є міцнісні характеристики та ППЕ. При руйнуванні потенційна енергія деформації пластин W перетворюється в ППЕ новоутворених частин твердого тіла. Проте, бажано провести додаткові дослідження по узгодженню розмірностей лівої та правої частини. За думкою [33] у критерії А. Гриффітса не враховано вплив пластичної деформації на процес утворення тріщини. Тому, при розрахунку руйнуючих напружень за критерієм А. Гриффітса значення результатів перебільшені.

Критерій Е. Орована, м [31, 32]:

$$2 \cdot l \geq K_{IpO} = 2 \cdot \gamma_{ef} \cdot E / \sigma^2, \quad (1.5)$$

де γ_{ef} – ефективна ППЕ, яка складається з суми ППЕ γ та питомої роботи пластичних деформацій $\gamma_{пл}$.

Критерій Е. Орована відрізняється від критерію А. Гриффітса наявністю ефективної ППЕ, що дозволяє урахувати пластичні деформації. Це наближає математичну модель (1.5) до реального процесу. Точність розрахунку підвищується. Але є ті ж самі недоліки, що і в (1.4): розмірності лівої і правої частини слід узгодити.

У роботі [23] Г. Ірвіном запропонований універсальний критерій руйнування, Дж/(м²·√м):

$$K_{Ip} = \sqrt{E \cdot \gamma / (1 - \mu^2)}, \quad (1.6)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона, в.о.

У (1.6) на відміну від попередньо вказаних критеріїв додатково враховано відношення пластичних до повздовжніх деформацій, пов'язані коефіцієнт інтенсивності напружень та ППЕ. Проте, розмірність критерію має не скомпенсований метр під коренем. Це вказує на недостатність або надлишок параметрів у правій частині рівняння і потребує додаткових досліджень.

Як видно з аналізу критеріїв руйнування А. Гриффітса, Г. Ірвіна та Е. Орована, ППЕ є одним з ключових параметрів, від якого залежить процес руйнування.

Ірвін сформулював силовий критерій руйнування суть якого полягає в тому, що тріщина отримує можливість руйнування, коли коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IH} досягає критичної величини $K_0 = \text{const}$, Па·м² [24]:

$$K_{IH} = K_0. \quad (1.7)$$

Формула (1.7) відповідає ідеальному пружному руйнуванню. Для урахування довжини пластичної зони вводять пластичну поправку Г. Ірвіна в основі якої лежить ідея збільшення довжини тріщини на половину довжини пластичної зони. Відповідно, радіус пластичної зони r , м [24]:

$$r = \left(2 \cdot \pi \cdot \sigma_T^2 \right) / K_{IH}^2, \quad (1.8)$$

де σ_T – межа текучості, Па.

Перевагами теорії руйнування Г. Ірвіна (та Е. Орована, так як вони незалежно один від одного прийшли до однакових результатів досліджень) є те, що:

– виконано перехід від ідеального матеріалу в моделі А. Гриффітса до реальних матеріалів;

- ураховано, що зона нелінійних дефектів мала в порівнянні з довжиною тріщини через теорію квазікрихкого руйнування;
- визначено радіус пластичної зони навколо верхівки тріщини.

Недоліками є те, що не враховано геометричні розміри масиву та тріщини, можливість їх взаємодії при руйнуванні. Також розмірності лівої та правої частини (1.8) не співпадають. Радіус пластичної зони виведено з похибкою.

Концентраційний критерій руйнування або критерій укрупнення тріщин $K_{жс}$ вперше представлений у роботі С. Н. Журкова зі співавторами [25]:

$$K_{жс} = t / L = c^{-1/3} / L, \quad (1.9)$$

де t – відстань між тріщинами, м;

L – довжина тріщини, м;

c – концентрація тріщин, в.о.

У цій роботі автор представив ідею термофлуктуаційного характеру процесу руйнування. Перевагою (1.9) є те, що ураховано відстань між тріщинами та можливість їх взаємодії (злиття) при виникненні напружень. Недоліком є те, що не враховано міцнісні характеристики твердого тіла. Тобто, якщо гіпотетично уявити існування двох тіл з різними механічними характеристиками, але з однаковими (або подібними) розмірами та розміщенням тріщин, то згідно з (1.9) руйнування наступить при прикладенні однакових навантажень. На практиці, потрібні різні навантаження для руйнування таких тіл, що обумовлено фізичними властивостями та механічними характеристиками гірських порід. Також повторена помилка досліджень А. Гриффітса (1.3) та Г. Ірвіна (1.8), – розмірності лівої та правої частини потребують уточнення. Фізика процесу порушена.

Для областей з неоднорідним коефіцієнтом тріщинуватості більш доцільно використовувати для визначення умов руйнування критерій Кулона-Мора [34]:

$$|\sigma_\tau| = C_f \cdot |\sigma_n|, \quad (1.10)$$

де σ_τ – нормальне напруження, Па;

C_f – коефіцієнт тертя, в.о.;

σ_n – дотичне напруження, Па.

Критерій Кулона-Мора визначає умови руйнування через тензор напружень. Це дозволяє урахувати нелінійний характер деформування при збільшенні навантажень, а також кут внутрішнього тертя. Недоліком є те, що згідно представленого критерію, модуль деформації на стадіях навантаження і розвантаження однаковий.

З аналізу представлених вище критеріїв руйнування, зроблено висновок, що ППЕ є одним з ключових параметрів, від якого залежить перебіг процесу руйнування гірських порід та утворення тріщин. Проте, ППЕ розглядається як незмінна величина. Не досліджено питання зміни ППЕ при зміні параметрів середовища руйнування. Тому, поставлено завдання отримати залежності зміни ППЕ гірських порід від магнітної індукції та геометрії дифузора кавітатора при гідрокавітаційному навантаженні з МІФКП. А також встановити закономірності зміни енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії гірських порід.

1.4 Аналіз математичних моделей питомої поверхневої енергії

За дослідженнями [22, 35] мірою опору матеріалу руйнуванню є коефіцієнт поверхневого натягу. Він застосовується до рідин. У механіці руйнування твердого тіла цей коефіцієнт має іншу фізичну інтерпретацію. Це

величина, яка є відношенням енергії W на межі матеріалу до одиниці поверхні S при постійній температурі та є ППЕ, Дж/м²:

$$\gamma = \frac{W}{S}. \quad (1.11)$$

У кількісному вигляді γ є роботою, що необхідна для створення одиниці нової поверхні матеріалу, що по суті є виникненням тріщин. Їх утворення і зростання супроводжується формуванням двох берегів. Внаслідок чого на утворення одиниці площі потрібно енергії 2γ . Ця ідея виражена у формулі довжини критичної тріщини, м [26]:

$$l_k = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot \sigma^2}, \quad (1.12)$$

де E – модуль пружності I роду, МПа.

Тріщина зростає після досягнення критичного значення σ . Зростання тріщини відбувається з утворенням нових поверхонь. Їх ППЕ дорівнює роботі міжатомних сил в об'ємі a^3 (a – параметр кристалічної решітки, м), віднесений до площі a^2 , Дж/м² [25, 35]:

$$\gamma = \frac{\sigma^2 \cdot a}{2 \cdot E}. \quad (1.13)$$

З аналізу (1.11 – 1.13) зроблено висновок, що ППЕ є ключовим чинником у процесі руйнування гірських порід і пов'язана з розривом міжмолекулярних зв'язків. Це також підтверджено дослідженнями Є. М. Морозова, Дж/м² [27]:

$$\gamma = \frac{a \cdot \sigma}{2}. \quad (1.14)$$

У математичній моделі ППЕ [36] враховано молекулярні параметри матеріалу, Дж/м²:

$$\gamma = \left(\Delta H_c \cdot N_k^{2/3} \right) / 4, \quad (1.15)$$

де ΔH_c – питома енергія сублімації матеріалу, Дж/м²;

N_k – кількість елементарних частинок у конденсованій системі, шт.

У (1.15) ППЕ представлено через енергетичні показники процесу сублімації. Недоліком є те, що не враховано механічні властивості породи.

Згідно [37, 38] ППЕ дорівнює потенціалу взаємодії між двома, розділеними навпіл площиною Міллера, частинами кристалу на одиницю площі, Дж/м²:

$$\gamma = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k \cdot \varepsilon_k}{s_a}, \quad (1.16)$$

де k – номер атомарного шару, в.о.;

ε_k – енергія взаємодії атома з усіма атомами шару, у якому він знаходиться, Дж;

s_a – площа поверхні одного атому з урахуванням зони дії атомарних зв'язків, м².

Перевагою (1.16) є те що ППЕ розглянута з точки зору міжатомної взаємодії та враховує енергетичний параметр кристалічних зв'язків ε_k . Недоліком (1.15) та (1.16) є те, що не враховано фізичні властивості матеріалу.

Математична модель визначення ППЕ на молекулярному рівні для площин Міллера з індексами 100, 110 та 111 представлена у роботі І. М. Странського та Р. Каїшева [39], Дж/м²:

$$\gamma(100) = \varphi_p / (2 \cdot r_0^2); \quad (1.17)$$

$$\gamma(110) = \varphi_p / (\sqrt{2} \cdot r_0^2); \quad (1.18)$$

$$\gamma(111) = \sqrt{3} \cdot \varphi_p / (2 \cdot r_0^2), \quad (1.19)$$

де φ_p – робота розриву зв'язків сусідніх елементарних частинок, Дж;

r_0 – відстань між сусідніми елементарними частинками, м.

Перевагою (1.17 – 1.19) є те, що враховано енергетичні показники процесу руйнування міжмолекулярних зв'язків. Недоліком є те, що ця математична модель адекватна тільки для квадратної форми кристалічної решітки, яка визначається за правилом Гібса – Вульфа [39]. А також не враховано фізичні властивості матеріалу.

А. Гриффітс [36] запропонував свою модель ППЕ твердого тіла δ_γ . На основі закону збереження енергії, при збільшенні тріщини на площу δS , виконується енергетична умова вигляду, Н/м²:

$$\delta_\gamma = G \cdot \delta S, \quad (1.20)$$

де G – приток енергії в вершину тріщини, що припадає на одиницю площі тріщини або інтенсивність енергії, що вивільнюється, Дж/м².

У (1.20) приток енергії в вершину тріщини прийнятий з урахуванням площі утворення нової поверхні. Для узгодження фізики процесу лівої та правої частини (1.18), бажано уточнити доцільність урахування δS .

ППЕ тріщини для пластини одиничної товщини з досліджень А. Гриффітса, Дж/м [36]:

$$U = 4 \cdot L \cdot \gamma, \quad (1.21)$$

де γ – ППЕ руйнування, Дж/м².

Теорія А. Гриффітса підходить тільки для крихких матеріалів. У реальному тілі у вершині тріщини виникає пластична деформація. Наявність пластичної зони навколо вершин тріщини призводить до її зростання. Наприклад, для полімерів встановлено, що величина ППЕ γ знаходиться в інтервалі $(100...1000) \text{ Дж/м}^2$, а не декілька Дж/м^2 , як передбачалось [34].

Перевагою моделі А. Гриффітса є відображення зменшення реальної міцності матеріалу відносно теоретичної; урахування того факту, що максимальне руйнуюче навантаження досягається після досягнення тріщиною критичних розмірів (індивідуальних для кожного окремого випадку). Недоліками є те, що не врахована можливість матеріалу опиратися росту тріщини, геометричні розміри масиву (довжина, ширина) в якому розглядалася тріщина, а також геометричні розміри самої тріщини (форма, великий, та малий радіуси).

На основі досліджень А. Гриффітса, незалежно один від одного, вчені Г. Ірвін та Е. Орован визначили, що поблизу поверхні тріщини виникає зона концентрації пластичних деформацій, тобто, виникає квазікрихке руйнування [24]. Фізика квазікрихкого руйнування полягає в тому, що лінійні розміри зони деформації біля тріщини малі відносно її довжини. Тому потік пружної енергії розраховується з урахуванням лише пружних характеристик. При цьому витрата енергії на руйнування обумовлена роботою пластичних деформацій.

Г. Ірвін дослідив, що енергетичний підхід А. Гриффітса адекватний тільки для квазікрихкого руйнування. Г. Ірвін представив питому енергію руйнування γ_p у вигляді суми ППЕ γ та питомої роботи пластичних деформацій γ_n [28].

Недоліком усіх представлених вище моделей є те, що у них не враховано вплив технологічних та фізико-механічних параметрів процесу руйнування. ППЕ представлена, як незмінна величина, у деяких порушена фізика процесу. Виникає задача виправити перелічені недоліки та дослідити залежності зміни ППЕ від технологічних параметрів руйнування.

ППЕ за теоретичними дослідженнями Дж. Гілмана [40], що експериментально підтверджені І. Обреїмовим, Дж/м² [29]:

$$\gamma = E \cdot \alpha_0^2 / (Y_0 \cdot \pi^2), \quad (1.22)$$

де α_0 – радіус дії міжмолекулярних сил притягання, м;

Y_0 – відстань між сусідніми площинами розщеплення, м.

Перевагою (1.22) є те, що в ній враховано міцнісні характеристики породи через модуль пружності I роду E , енергетичні параметри взаємодії елементарних частинок через радіус дії міжмолекулярних сил притягання α_0 та параметр кристалічної решітки через відстань між сусідніми площинами розщеплення Y_0 . Відрізняється (1.22) від розглянутих, тим що у ній поєднано молекулярні та міцнісні параметри. Тому у якості базової моделі для дослідження ППЕ гірських порід під дією гідрокавітаційного навантаження з МІФКП обрано (1.22).

З аналізу наукових та практичних досягнень по досліджуваній темі визначені мета та завдання дослідження, вказані вище.

Висновки

1. На основі теорії графів запропоновано два десятивершинні орієнтовані графи руйнування гірських порід: зі строго паралельними дугами та з не строго паралельними дугами. З першого отримано 72 парних та 576 потрійних комбінованих способів навантаження. З другого отримано 144 парних та 5184 потрійних комбінованих способів навантаження.

2. Запропоновано новий комбінований енергозберігаючий обертово-гідрокавітаційний спосіб руйнування гірських порід з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку для зниження енергоємності руйнування гірських порід за рахунок вивільнення внутрішньої потенційної енергії масиву.

3. Аналіз критеріїв руйнування Г. Ірвіна, Е. Орована, А. Гріффітса, С. Н. Журкова та інших показав, що питома поверхнева енергія є одним з ключових чинників руйнування гірських порід та розглядається як незмінна величина. Для розгляду питомої поверхневої енергії, як змінної величини потрібна уточнена математична модель з урахуванням технологічних та механічних параметрів руйнування.

4. Результати аналітичних досліджень комбінованих способів руйнування гірських порід графами представлені в роботі автора [41].

5. З аналізу наукових та практичних досягнень по досліджуваній темі визначені мета та завдання дослідження, вказані вище.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ МЕТОДИКИ ТА ПРОГРАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

2.1 Планування аналітичних та експериментальних досліджень

Для проведення досліджень по визначенню зміни ППЕ під дією гідрокавітаційного навантаження з МІФКП, обрано незалежні змінні параметри: довжину дифузора та магнітну індукцію у дифузорі кавітатора різця кавітаційного. Вибір цих параметрів обумовлений тим, що від них залежить виникнення і характер перебігу кавітаційного процесу. Гідрокавітаційне навантаження з МІФКП обумовлює утворення тріщинуватості на поверхні гірських порід, зміну ППЕ та, як результат, зниження енергоємності руйнування. Обрані параметри відповідають вимогам [42]: змінюються за побажанням дослідника; визначаються з похибкою не більшою, ніж 5 %; вимірювані; встановлення деякого рівня одного не залежить від прийнятих значень іншого; комбінація на будь-яких рівнях здійснення.

У дисертаційній роботі будуть створені і представлені у наступних розділах математичні моделі:

- енергоємності руйнування гірських порід, в залежності від ППЕ;
- ППЕ, що залежить від технологічних параметрів руйнування під дією гідрокавітаційного навантаження з МІФКП.

Завданням експериментального дослідження є підтвердження або спростування правильності вищеперелічених моделей.

ППЕ при руйнуванні гірських порід обертово-гідрокавітаційним способом з МІФКП з використанням різця кавітаційного є одним з основних інтегральних параметрів оптимізації об'єкту дослідження. ППЕ, як параметр оптимізації, відповідає наступним вимогам [42]: характеризує процес руйнування гірських порід, так як пропорційна роботі утворення нових

поверхонь матеріалу; має кількісний характер; визначається для різних видів гірських порід, тобто є універсальним показником.

Критерієм оптимізації є ППЕ гірських порід при різних режимах руйнування обертово–гідрокавітаційним способом з МІФКП. Задачею оптимізації є знаходження значень довжини дифузора та магнітної індукції всередині різця кавітаційного, що забезпечують мінімальну питому поверхневу енергію. Для визначення залежності ППЕ гірських порід від довжини дифузора та магнітної індукції у дифузорі кавітатора різця кавітаційного обрано метод математичного моделювання. Дослідження проводиться на основі математичної моделі зміни ППЕ від обраних незалежних змінних параметрів. На питому поверхневу енергію гірських порід впливають також:

- відстань між атомами структури;
- тип кристалічної решітки;
- межа міцності на розрив міжмолекулярного зв'язку;
- коефіцієнт тертя інструменту об породу;
- теоретична межа міцності;
- модуль пружності I роду;
- коефіцієнт Пуассона;
- тощо.

Але ці параметри не було прийнято як зміни стану, оскільки не виконуються умови керованості і незалежності.

Для визначення залежності ППЕ гірських порід від обраних змінних параметрів (довжина дифузора та магнітна індукція у дифузорі кавітатора різця кавітаційного) прийнято повночинниковий експеримент вигляду 3^k (k – кількість незалежних змінних параметрів). Досліджувані змінні варіюються на трьох рівнях: максимальному (+), мініимальному (-) і нульовому (0), відносно якого два перші рівні розташовані симетрично [43]. При такій кількості рівнів, для дослідження енергоємності руйнування, обрано ненасичений центральний композиційний план (план Бокса) типу B_n [44, 45]. Тобто, чинники приймають значення, симетричні відносно центру плану. Ненасиченість плану

обумовлена тим, що кількість незалежних змінних параметрів менша кількості дослідів. Тип B_n є симетричним планом третього порядку з ядром у вигляді повночинникового експерименту 3^k . Результати дослідів в нульовій точці застосовуються для перевірки гіпотези про адекватність моделі експериментальним даним [48]. При такому типі плану обрано поліноміальний клас регресійної моделі [42, 43] (2.1-2.3). Якщо обрана модель не відповідатиме перевірці на адекватність, то степінь полінома буде збільшено.

Цільова функція оптимізації для дослідження ППЕ гірських порід в залежності від довжини дифузору та магнітної індукції у дифузорі кавітатора різця кавітаційного, перетворена згідно загальної теорії [42-43, 46-47] має вигляд:

$$\gamma = b_0 + b_1 \cdot B + b_2 \cdot l_{\partial} + b_{12} \cdot B \cdot l_{\partial} + b_{11} \cdot B^2 + b_{22} \cdot l_{\partial}^2; \quad (2.1)$$

$$B_{\min} \leq B \leq B_{\max} (B \geq 0); \quad (2.2)$$

$$l_{\partial \min} \leq l_{\partial} \leq l_{\partial \max} (l_{\partial} \geq 0), \quad (2.3)$$

де γ – критерій оптимізації - ППЕ гірських порід, Дж/м²;

b_j – коефіцієнти рівняння регресії, в.о.;

B_{\min}, B_{\max} - граничні обмеження магнітної індукції у дифузорі кавітатора різця кавітаційного, мТл;

$l_{\partial \min}, l_{\partial \max}$ – граничні обмеження довжини дифузору кавітатора різця кавітаційного, м.

Кількість основних дослідів для ненасиченого центрального композиційного плану складає, шт. [45]:

$$N_{od} = i^k = 3^2 = 9, \quad (2.4)$$

де $i=3$ – кількість рівнів варіювання, шт.;

k – кількість незалежних змінних параметрів, шт.

Обраний тип плану передбачає мінімальну кількість рівнів варіювання змінних параметрів рівну трьом. Це дозволяє більш точно витримувати режими роботи при проведенні дослідів у порівнянні з планами, які потребують зростання числа рівнів варіювання незалежних змінних параметрів. На кожному рівні варіювання проводиться рівна кількість дослідів [44-45, 48].

Для побудови плану експерименту необхідно обрати критерії оптимальності. Вони поділяються на дві групи: критерії пов'язані з помилками коефіцієнтів рівняння регресії та критерії пов'язані з помилками поверхні відгуку. Перша група критеріїв характеризує еліпсоїд розсіювання коефіцієнтів, математичним сподіванням і дисперсією значень помилок. Просторове розташування, форма, і розмір еліпсоїда повністю залежать від плану експерименту. До першого типу відносяться критерії: А, D, Е тощо [49]. Критерії другої групи використовуються при вирішенні задач опису поверхні відгуку, визначення обмежень та значення параметрів.

Обраний для дослідження ненасичений центральний композиційний план типу B_n наближений до D- та G- оптимальних планів. Критерій G-оптимальності дозволяє побудувати план з мінімальним значенням найбільшої помилки в описі функції відгуку [49]. Критерій D-оптимальності - відповідає мініимальному обсягу еліпсоїда розсіювання помилок. У даному плані чинники максимально незалежні один від одного. Цей план мінімізує очікувану помилку передбачення функції відгуку.

Матриця планування експериментального дослідження енергоємності руйнування гірських порід в умовних змінних (де $N_z = \sum_{i=1}^N x_i^2$ [50]) приведена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Матриця планування експерименту у неявному вигляді

№ дослідів	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	y
1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	-	-	+	+	+	y_1

Закінчення табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
2	+	-	0	0	+	0	y_2
3	+	-	+	-	+	+	y_3
4	+	0	-	0	0	+	y_4
5	+	0	0	0	0	0	y_5
6	+	0	+	0	0	+	y_6
7	+	+	-	-	+	+	y_7
8	+	+	0	0	+	0	y_8
9	+	+	+	+	+	0	y_9
N_z	9	6	6	4	4	4	-

Для усіх елементів матриці планування виконується умова парної ортогональності стовпців [49]. Чинник x_0 – фіктивна змінна, що допомагає спростити розрахунки коефіцієнтів рівняння регресії.

2.2 Схема експериментального стенду досліджень зміни питомої поверхневої енергії гірських порід під дією гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку

Для проведення експериментальних досліджень зміни ППЕ гірських порід під дією гідрокавітаційного навантаження з МІФКП створено схему стенду, рис. 2.1. Експериментальний стенд призначено для вивчення зміни ППЕ при зміні параметрів, що визначають режим гідрокавітаційного навантаження з МІФКП: довжини дифузору та магнітної індукції у дифузорі кавітатора різця кавітаційного. Функціями системи є збільшення штучної та ініціювання зростання природної тріщинуватості вибою, зниження ППЕ для зменшення енергоємності руйнування гірських порід.

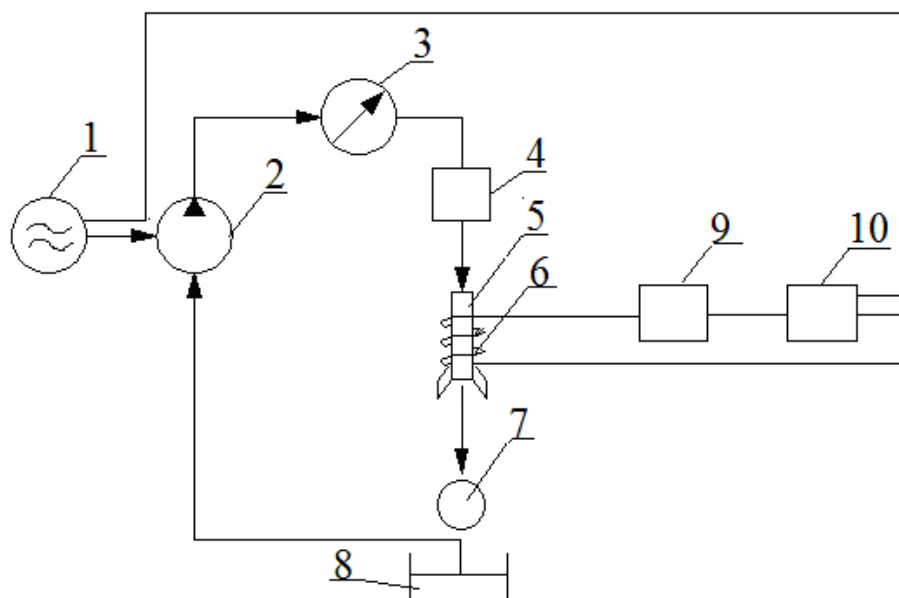


Рисунок 2.1 – Схема експериментального стану для досліджень зміни питомої поверхневої енергії гірських порід під дією гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку: 1 – електрична мережа змінного струму 220 В; 2 – відцентровий насос JEX 500; 3 – манометр ДМ 05063; 4 – муфта; 5 – кавітатор; 6 – обмотка індуктивності постійного струму; 7 – зразок гірської породи; 8 – резервуар; 9 – випрямляч ВСА-5К; 10 – блок резисторів ПЭВ-100

Схема працює наступним чином. Промивна рідина відкачується за допомогою відцентрового самовсмоктуючого насосу JEX 500 (позиція 2) з резервуару 8. Потужність насосу – 500 Вт, частота обертання двигуна насосу – $48,3 \text{ с}^{-1}$ (2900 об/хв.), продуктивність $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ (80 л/хв.), максимальна висота всмоктування – 8 м. Максимальна температура рідини, що перекачується 313 К (+ 40 °С) [46]. Вибір типу насосу обумовлений тим, що він є самовсмоктуючим та не потребує додаткових елементів приводу. Це зменшує габарити установки та кількість елементів схеми і тим самим підвищує її надійність.

Тиск у системі подачі води вимірювався за допомогою манометра ДМ 05063 (позиція 3). Робочий діапазон реєстрації значень від 0 до 1 МПа при температурі від 233 до 423 К (- 40 до + 150 °С). Клас точності – 2.5 [47].

За допомогою муфти 4 на виході трубопроводу кріпиться кавітатор 5. Останній є вузлом різця кавітаційного, що забезпечує гідрокавітаційне навантаження з МІФКП на масив гірських порід. Обмотка індуктивності постійного струму 6 розміщена на кавітаторі служить для створення постійного магнітного поля та забезпечує фокусування кавітаційних каверн. На виході кавітатора розміщується зразок гірської породи 7 для гідрокавітаційної обробки з МІФКП. Обмотка 6 живиться від електричної мережі 220 В і під'єднана через випрямляч ВСА-5К (позиція 9) [51] Працює у режимі плавного регулювання випрямленого струму та напруги в межах (0...12) А та (0...65) В, відповідно. Умови експлуатації: температура оточуючого середовища (233...313) К; відносна вологість повітря до 80%. Котушка індуктивності в умовах роботи постійного струму не створює реактивного опору. Тому, для уникнення короткого замикання у ланцюзі 1-10-9-6 (рис. 2.1) та для забезпечення безперебійної роботи випрямляча використано блок резисторів ПЭВ-100 (позиція 10), з'єднаних паралельно. Струм і напруга у обмотці постійного струму кавітатора визначались за допомогою амперметра і вольтметра випрямляча ВСА-5К. Магнітна індукція вимірювалась магнітметром НТ20 [52], додаток Б. Діапазон вимірювання значень магнітної індукції (0...2000) мТл. Точність вимірювань (0,1...1) мТл, похибка ± 2 %. Температура оточуючого середовища пристрою (278...313) К, відносна вологість (20...80) %.

Для проведення експерименту визначені наступні умови:

- потрібно використовувати закриті приміщення;
- лабораторний стенд повинен бути розміщений у приміщенні захищеному від сторонніх вібрацій, у тому числі побутових, допустимі межі (0,25...55) Гц;
- температура оточуючого середовища, у тому числі промивної рідини, повинна знаходитись в межах (288...298) К;
- відносна вологість приміщення (10...80) % без конденсації;
- атмосферний тиск (630...800) мм рт. ст

Зображення різця кавітаційного, запропонованого до промислового виробництва, представлено на рис. 2.2.

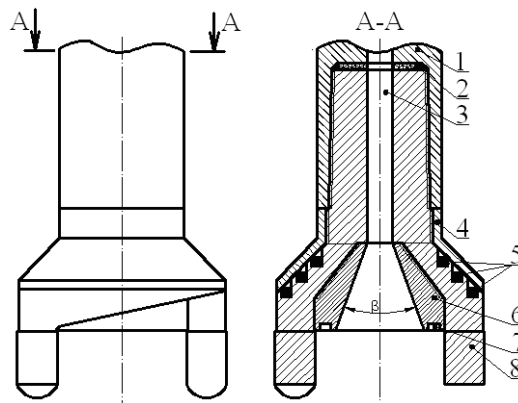


Рисунок 2.2 – Різець кавітаційний з фрагментом бурової штанги: 1 – фрагмент бурової штанги; 2 – прокладка гумова; 3 – канал підвідний; 4 – кожух; 5 – магніт; 6 – насадка дифузорна; 7 – паз монтажний; 8 – вставка твердосплавна.

Різець кавітаційний приєднується до бурової штанги 1 за допомогою конічної замкової різьби [50]. Між різцем та буровою штангою виконано зазор для зниження концентрації навантаження на різьбу. У зазор поміщено прокладку гумову 2. Функція останньої – запобігання зростання тиску між буровою штангою та підвідним каналом 3. Кожух 4 застосовується для фіксації положення магнітів 5 [53] та захисту їх від механічних пошкоджень. Магніти 5 служать для забезпечення фокусування кавітаційних бульбашок. Фізика процесу описана у підрозділі 1.2. У насадці дифузорній 6 виникає кавітаційний режим потоку, завдяки її геометричним особливостям. Вона кріпиться за допомогою конічної різьби [50] та має пази монтажні 7 під ключ спеціального виконання. При необхідності зміни довжини дифузору, дифузорна насадка замінюється. Основною ріжучою частиною різця є твердосплавні вставки 8. Рекомендовані матеріали для їх виготовлення, згідно ГОСТ Р 51047-97 [54]: марки сплавів ВК8В, ВК11ВК, ВК10КС або ВК12КС [54-55]. Матеріали, з яких рекомендовано виконувати решту частин різця (крім магнітів 5) згідно ГОСТ Р

51047-97 [54] та ГОСТ Р 50300-92 [55]: сталі марок 40Х, 40ХН, 30ХГСА, 35ХГСА, 50Х4МФА або 60Н6МА.

3D модель різця кавітаційного для промислового виробництва розроблена на базі РШ 140 і представлена на рис. 2.3. РШ-140 підходить для міцних монолітних порід з коефіцієнтом міцності по шкалі Протодяконова до 16. Розроблений різець підходить для того ж класу порід.



Рисунок 2.3 – Різець РШ-140

На виході дифузору різця кавітаційного під дією розтягуючих напружень виникає розрідження в обмеженій області рідини. У результаті цього утворюються пустоти – каверни чи кавітаційні бульбашки, які заповнені парами рідини і розчиненими в ній газами. Температура схлопування та тиск каверн залежить від параметрів дифузору: довжини дифузору l_0 і кута розкриття β . Для виникнення кавітації необхідно забезпечити виконання умови: $Re > 7340$ [56 – 57], де Re – число Рейнольдса. Тому у розділі 3 буде розраховано необхідне значення подачі потоку рідини до виходу різця, від якого залежить Re . Зуби різця з твердосплавними вставками виконують дві основні функції. Перша – це безпосереднє різання гірських порід. Друга - передача імпульсів. Тобто, зуби є хвилеводами. Їх довжина не повинна перевищувати довжину кавітаційної зони для того, щоб пікова точка кавітаційних каверн «виходила» на поверхню гірської породи. Тим самим створюючи зону передруйнування та зменшуючи опір різанню.

Кавітаційний потік під дією постійного магнітного поля прецесує з субрезонансною частотою до власної частоти коливань кристалічної структури

гірських порід. Це спричиняє активізацію внутрішнього енергетичного потенціалу порід, що руйнуються. Міжмолекулярні зв'язки порід руйнуються за рахунок виникнення субрезонансних навантажень від коливальних імпульсів кавітаційного потоку. Виникають додаткові до природніх технологічні тріщини. Зростаючи, вони утворюють магістральну тріщину і направляють її вихід до відкритої поверхні. При цьому енергоємність руйнування знижується.

2.3 Програма проведення експериментальних досліджень

Із експериментальних даних [58] відомо, що при куті розкриття дифузору $\beta=60^\circ$, частота автоколиваний системи досягає максимуму. Тому, це значення прийняте, для усіх кавітаторів.

При виборі граничних умов незалежних змінних параметрів, ураховано наступні типи обмежень:

- а) принципові, що не можуть бути змінені в ході проведення експерименту: структура масиву, його фізико – механічні характеристики;
- б) техніко-економічні: вартість руйнування гірських порід, вартість обладнання та контрольно-вимірювальних приладів;
- в) експериментальні: застосування існуючого програмного та лабораторного забезпечення для обробки результатів досліджень.

Вибір інтервалу варіювання незалежних змінних параметрів та їх значення на усіх рівнях варіювання представлені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення незалежних змінних параметрів та інтервалів варіювання

Найменування і позначення чинників	Рівні варіювання			Інтервали варіювання
	-1	0	+1	
1	2	3	4	5
Магнітна індукція у дифузори B , мТл	15	30	45	15
Довжина дифузора l_0 , мм	10	30	50	20

Рівняння регресії у загальному вигляді представлено у вигляді (2.1). На його основі введено умовні позначення: $x_0 = I_0$; $x_1 = B$; $x_2 = l_0$; $x_3 = B \cdot l_0$; $x_4 = B^2$; $x_5 = l_0^2$ та побудовано матрицю планування експерименту в явному вигляді, табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - Матриця планування експерименту в явному вигляді

№ дослідів	Порядок проведення дослідів	Планування					
		x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	2	3	4	5	6	7	8
1 етап							
1	4	1	0,015	0,01	0,015	0,000225	0,01
2	6	1	0,015	0,01	0,045	0,000225	0,09
3	2	1	0,015	0,01	0,075	0,000225	0,25
2 етап							
4	8	1	15	0,03	0,003	0,0009	0,01
5	9	1	30	0,03	0,009	0,0009	0,09
6	7	1	45	0,03	0,015	0,0009	0,25
3 етап							
7	3	1	15	0,05	0,0045	0,002025	0,01
8	5	1	30	0,05	0,0135	0,002025	0,09
9	1	1	45	0,05	0,0225	0,002025	0,25

План проведення експериментальних досліджень зміни ППЕ гірських порід під дією гідрокавітаційного навантаження з МІФКП передбачає 3 етапи. Це зроблено з метою економії матеріальних ресурсів та часу. Для першого етапу дослідження на лабораторний стенд буде встановлено кавітатор № 1 з довжиною дифузору 10 мм. На ньому виконано обмотку постійного струму з 200 витків мідного проводу, діаметр поперечного перерізу 0,5 мм². Перший дослід проводитиметься при магнітній індукції 15 мТл, другий – 30 мТл, третій – 45 мТл. Магнітна індукція змінюватиметься за допомогою випрямляча ВСА-5К. Для другого етапу дослідження на лабораторний стенд буде встановлено кавітатор № 2 з довжиною дифузору 30 мм. На ньому виконано

обмотку постійного струму з 250 витків мідного проводу, діаметр поперечного перерізу $0,5 \text{ мм}^2$. Четвертий дослід проводитиметься при магнітній індукції 15 мТл, п'ятий – 30 мТл, шостий – 45 мТл. Для третього етапу дослідження на лабораторний стенд буде встановлено кавітатор № 3 з довжиною дифузору 50 мм. На ньому виконано обмотку постійного струму з 300 витків мідного проводу, діаметр поперечного перерізу $0,5 \text{ мм}^2$. Сьомий дослід проводитиметься при магнітній індукції 15 мТл, восьмий – 30 мТл, дев'ятий – 45 мТл.

Геометричні параметри кавітаторів занесені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Геометричні параметри кавітаторів

Номер кавітатора	Довжина дифузору l_0 , мм	Діаметр критичного перерізу дифузору D_1 , мм	Діаметр виходу дифузора D_3 , мм	Кут розкриття β , градус
1	2	3	4	5
№ 1	10	9	20	60
№ 2	30	9	45	60
№ 3	50	9	70	60

Важливими параметрами для створення кавітації є напір та швидкість потоку рідини на виході дифузору. Від їх значень залежить режим руху рідини та число Рейнольдса Re (як вказано вище, умовою кавітації є $Re > 7340$ [57]). Розрахунок необхідних значень напору та швидкості потоку рідини розраховані і представлені у розділі 3.

Дослідження зміни ППЕ γ (Дж/м²) під дією гідрокавітаційного навантаження з МІФКП при зміні магнітної індукції B (мТл) та довжини дифузору l_0 (м) проводитиметься для вапняку, пісковика, граніту та гнейсу. Обґрунтування вибору та підготовка зразків гірських порід представлені нижче у підрозділі 4.1. За результатами проведення дослідів буде отримано два графіки, що відповідають кожному етапу досліджень (табл. 2.3):

– перший – $\gamma = f(B)$ при $l_0 = \text{const}$;

– другий – $\gamma=f(l_0)$ при $B=\text{const}$.

На кожному графіку буде знаходитись по чотири криві, що відповідають кожному з видів гірських порід: вапняку, пісковика, граніту та гнейсу, відповідно.

Експериментально значення ППЕ визначатиметься через модуль пружності I роду, відстань між сусідніми площинами розщеплення та радіус дії молекулярних зв'язків за (1.22). Для вимірювання модуля пружності I роду використано неруйнівний метод наноіндентування [50] установкою «Мікрон Гамма», додаток В. Метод наноіндентування заснований на безперервній автоматичній реєстрації залежності навантаження на індентор від глибини вдавлювання з побудовою діаграми навантаження [50]. Перевагами даного методу є те, що він дозволяє:

- вимірювати глибину вдавлювання індентора при максимальному навантаженні;
- досліджувати пружно-пластичні властивості матеріалу;
- визначати роботу, витрачену на подолання опору матеріалу вдавлюванню (по площі над кривою навантаження);
- визначати роботу пружно-пластичних деформацій (по площі над кривою розвантаження);
- дозволяє оцінювати дисперсію та неоднорідність міцнісних властивостей.

При визначенні модуля пружності I роду використано індентор Берковича. Цей вид індентору дозволяє проводити дослідження не тільки на мікротвердість, а й на тріщиностійкість. Діапазон діючої на індентор сили (0,01...5) Н, глибина занурення (h) (0,01...200) мкм, швидкість навантаження (0,01...100) сН/с, час витримування зразка під навантаженням (0...600) с., діапазон сканування 30x30 мм, швидкість сканування (20...60) мкм/с. Програмна методика розрахунків міцнісних характеристик матеріалів базується на статистичному методі. Останній заснований на використанні закону Гука при розтягуванні і крученні. Перевага статичного методу над динамічним

полягає у тому, що ураховується зв'язок між поздовжньою і поперечною деформаціями.

Радіус дії молекулярних сил та відстань між сусідніми площинами розщеплення визначатимуться за допомогою рентгеноструктурного дифрактометру «Regaku Ultima IV», додаток Г.

2.4 Методика статистичного аналізу

Статистичний аналіз рівняння регресії складається з оцінки: похибки досліду; значущості коефіцієнтів рівняння регресії; адекватності моделі.

Коефіцієнти рівняння регресії визначаються, в.о. [44]:

$$b_i = \frac{1}{N_{od}} \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot \bar{y}_u, \quad (2.5)$$

де u – номер досліду, в.о.;

x_{iu} – значення довжини дифузору при u -тому досліді, м;

\bar{y}_u – середнє значення змінної стану при всіх паралельних дослідах, Дж/м².

Розрахункова середня змінна стану, Дж/м² [44]:

$$\bar{y}_u = \frac{1}{m_n} \cdot \sum_{k=1}^{m_n} y_{um_n}, \quad (2.6)$$

де m_n – кількість паралельних (повторних) дослідів, шт.;

y_{um} – значення змінної стану (параметру оптимізації) при m_n -тому повторному досліді, Дж/м²;

Оцінку кількості повторних експериментів визначено за методикою побудованою на основі коефіцієнта варіації δ_{θ} , який визначається зі співвідношення, в. о. [59]:

$$\delta_{\theta} = \frac{S_y}{\bar{y}_u}, \quad (2.7)$$

де S_y – емпіричне середньоквадратичне відхилення цільової функції, для досліджуваного випадку – енергоємності руйнування, Дж/м³.

Середньоквадратичне відхилення S_y визначається з [60]:

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{u=1}^N (y_{um} - \bar{y}_u)^2. \quad (2.8)$$

Вибираючи відповідне значення рівня ймовірності P і відносну похибку k , визначено мінімально допустимий коефіцієнт варіації δ_k , який відповідає числу повторних дослідів m , в. о. [59]:

$$\delta_k = \frac{k \cdot \sqrt{m_n}}{t}, \quad (2.9)$$

де t – критерій Стюдента, який визначається залежно від рівня ймовірності P та числа ступенів вільності $f=m_n-1$, в. о.

Обрана кількість повторних дослідів достатня, якщо виконується умова:

$$\delta_{\theta} \leq \delta_k. \quad (2.10)$$

Якщо умова (2.8) не виконується, то кількість паралельних дослідів m необхідно збільшити.

Перед розрахунком похибки досліду проводиться перевірка дисперсії. Остання являє собою розсіяння дослідів у кожній точці простору [44]:

$$s_y^2 = \frac{1}{m_n - 1} \cdot \sum_{k=1}^{m_n} (y_{um} - \bar{y})^2. \quad (2.11)$$

Перевірка однорідності дисперсій виконується по критерію Кохрена [44]:

$$G_p < G_T(q, f_1, f_2); \quad (2.12)$$

$$G_p = S_{y \max}^2 / \sum_{u=1}^N S_y^2, \quad (2.13)$$

де $G_T(q, f_1, f_2)$ - табличне значення критерію Кохрена, в.о.;

$q=0,05$ - рівень значущості для технічних розрахунків, в.о. [44];

$f_1 = m_n - 2, f_2 = N_{od}$ - числа ступенів свободи, шт., шт.;

$S_{y \max}^2$ - максимальне значення дисперсії, Дж/м².

Середнє значення дисперсії визначає похибку досліду [44]:

$$s_0^2 = \frac{1}{N_{od}} \cdot \sum_{k=1}^N s_y^2. \quad (2.14)$$

Якщо виконується умова (2.11), то дисперсія є однорідною. Якщо умова не виконується, то необхідно збільшити число паралельних дослідів m , або змінити метод контролю змінної стану.

Оцінку значущості коефіцієнтів виконують двома рівноцінними способами. Спочатку визначають дисперсію коефіцієнтів рівняння регресії [44]:

$$s_b^2 = s_0^2 / N_{od}. \quad (2.15)$$

Перший спосіб оцінки значущості коефіцієнтів:

$$t_{ip} > t_T(q, f), \quad (2.16)$$

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_b}, \quad (2.17)$$

де $t_T(q, f)$ – табличне значення критерію Стюдента, в.о.[44];

$f = N_{od} \cdot (m_n - 1)$ – число ступенів свободи, в.о.;

$|b_i|$ – модуль значення i -го коефіцієнту регресії, в.о.

Для перевірки значущості коефіцієнтів регресії за другим способом використано довірчий інтервал [44]:

$$|b_i| > |\Delta b_i|; \quad (2.18)$$

$$\Delta b_i = \pm t_T \cdot S_b. \quad (2.19)$$

Якщо виконуються умови (2.18-2.19), то i -й коефіцієнт вважається значущим. Якщо умови не виконуються, то відповідний коефіцієнт вважається незначущим й виключається з рівняння регресії.

Точність апроксимації експериментальних даних визначається за допомогою дисперсії адекватності [44]:

$$S_{ad}^2 = \frac{m_n}{N_{od} - l_q} \cdot \sum_{u=1}^{N_{od}} (\bar{y}_u - \tilde{y}_u)^2, \quad (2.20)$$

де l_q – число членів рівняння регресії, які залишилися після оцінки значущості, шт.;

\tilde{y}_u – змінна стану, розрахована відповідно до рівняння регресії, Дж/м².

Перевірка адекватності виконується по критерію Фішера [44]:

$$F_p < F_T(q, f_1, f_2); \quad (2.21)$$

$$F_p = S_{ad}^2 / S_0^2, \quad (2.22)$$

де $F_T(q, f_1, f_2)$ – табличне значення критерію Фішера [44].

Якщо умова (2.21) виконується, то рівняння регресії вважається адекватним. Тобто, розсіювання експериментальних даних змінної стану відносно рівняння регресії того ж порядку, що й розсіювання, викликане змінами в об'єкті дослідження (похибка досліду). Адекватне рівняння регресії використовується для пошуку області оптимуму об'єкту дослідження. Якщо умова не виконується – необхідно зменшити інтервали варіювання чинників й повторити дослід.

Висновки

1. Для дослідження енергоємності руйнування порід, в залежності від питомої поверхневої енергії гірських порід при зміні довжини дифузору та магнітної індукції у дифузорі кавітатора різця кавітаційного, обрано ненасичений центральний композиційний план. Мінімальна кількістю рівнів варіювання змінних – три. Кількість дослідів – 9, кількість повторних дослідів у кожній точці – 3. Ядром плану є повночинниковий експеримент вигляду 3^k .

2. У якості незалежних змінних параметрів дослідження обрані довжина дифузору та магнітна індукція у дифузорі кавітатора різця кавітаційного. Рівні варіювання: довжини дифузору – 10 мм, 30 мм, 50 мм; магнітної індукції у дифузорі різця кавітаційного – 15 мТл, 30 мТл, 45 мТл.

3. Результати планування експериментальних досліджень зміни питомої поверхневої енергії гірських порід при руйнуванні обертово-гідрокавітаційним способом досліджень опубліковані у [61].

РОЗДІЛ 3

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ, ВІД ЯКИХ ЗАЛЕЖИТЬ ПИТОМА ПОВЕРХНЕВА ЕНЕРГІЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ РУЙНУВАННІ

3.1 Базові параметри що визначають питому поверхневу енергію

Як відомо з [62], зміна ППЕ впливає на руйнування твердого тіла. З часів досліджень Алана Гриффітса ППЕ розглядається як «константа матеріалу». Вчені надають їй різну інтерпретацію. Згідно експериментальних даних [62], ППЕ залежить від оточуючого матеріал середовища і впливає на швидкість поширення тріщини. Ці експериментальні дані спростовують припущення, що ППЕ є «константою матеріалу».

Для зменшення енергоємності руйнування гірських порід необхідно знайти параметри при зміні яких зменшується ППЕ. Згідно (1.22) одним із параметрів від якого залежить ППЕ є відстань між сусідніми площинами розщеплення Y_0 . Із формули Вульфа-Брегга Y_0 , м [63]:

$$Y_0 = \eta \cdot \lambda / (2 \cdot \sin \theta), \quad (3.1)$$

де η – порядок дифракційного спектра потоку електронів матеріалу, в. о.;

λ – довжина хвилі потоку електронів матеріалу, м;

θ – кут відбиття дифракційного потоку електронів матеріалу, градус.

З урахуванням (3.1) ППЕ (1.22) γ приймає вигляд, Дж/м²:

$$\gamma = \frac{2 \cdot E \cdot \alpha_0^2 \cdot \sin \theta}{\eta \cdot \lambda \cdot \pi^2}. \quad (3.2)$$

У (3.2) враховано молекулярні параметри гірських порід, але є необхідність урахування в ППЕ технологічних параметрів руйнування та тріщинуватості.

Одним із параметрів, яким характеризується вектор площини розщеплення кристалічної решітки гірських порід при руйнуванні є індекс Міллера [66]. Цей індекс ураховано при розрахунку модуля пружності I роду за формулою, що містить молекулярні параметри, Па [64]:

$$E = \frac{2 \cdot c}{c + 1} \cdot K, \quad (3.3)$$

де c – число простору решітки, $c=1, 2$ або 3 , в. о. ;

K – коефіцієнт поверхневого натягу матеріалу, Н/м.

Фізичний зміст c пов'язаний з площинами розщеплення та індексами Міллера. Якщо площина розщеплення перетинає три грані кристалічної решітки, то число простору решітки $c=3$, якщо дві, то $c=2$, якщо одну, то $c=1$ (Наприклад: для площини (111) $c=3$, для площини (101) $c=2$, для площини (100) $c=1$).

Математична модель (3.3) потребує уточнення, так як вона має емпіричний характер та розмірності її лівої та правої частини не узгоджено. У знаменнику правої частини не вистачає параметра довжини, яким є параметр кристалічної решітки a . Пружні властивості тіла залежать від дії молекулярних зв'язків, які характеризуються a . Чим більша відстань між молекулами в упакованні кристалічної решітки, тим слабша дія Ван-дер-Ваальсових сил і тим менше значення модуля пружності I роду, і навпаки.

Після урахування a модуль пружності I роду з урахуванням молекулярних параметрів, Па:

$$E = \frac{2 \cdot c}{c + 1} \cdot \frac{K}{a}. \quad (3.4)$$

Коефіцієнт поверхневого натягу K має однаковий фізичний зміст з ППЕ. Тобто, це сила, що діє на одиницю довжини контуру поверхні і прагне скоротити поверхню до мінімуму [65]:

$$K = Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta, \quad (3.5)$$

де Z – кількість атомних шарів у поверхневому шарі 1 м^2 матеріалу, в. о.;

Q – питома теплоємність плавлення матеріалу, що руйнується, Дж/кг;

ρ – густина матеріалу, що руйнується, кг/м³;

δ – товщина поверхневого шару матеріалу, м.

При розробці математичних моделей руйнування гірських порід, континуальний підхід класичної механіки суцільних середовищ не може бути повністю застосований. Тому, проведено аналіз молекулярних параметрів гірських порід, що дозволять урахувати дискретність їх атомарної кристалічної будови при руйнуванні.

Після узгодження (3.5) з (3.4):

$$E = \frac{2 \cdot c}{(c+1) \cdot a} \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta. \quad (3.6)$$

Відмінність існуючих математичних моделей модуля пружності I роду від запропонованої полягає у різності підходів: континуальний підхід класичної механіки суцільних середовищ та дискретний підхід з урахуванням параметрів молекулярної будови гірських порід, відповідно.

Ще одним параметром від якого залежить ППЕ, згідно (1.22), є радіус дії молекулярних зв'язків α_0 . За фізичною суттю це максимальна відстань між центрами тяжіння сусідніх елементарних частинок на якій діють взаємні сили притягання. Відстань дії міжмолекулярних зв'язків b [67] є тією ж самою величиною. Тому, у подальших розрахунках буде використовуватись радіус дії молекулярних зав'язків α_0 .

Радіус дії молекулярних зв'язків, м [67]:

$$\alpha_0 = \frac{\hbar^2 \cdot \nu^2}{\pi \cdot d^2 \cdot m \cdot V^2 \cdot \sigma_p \cdot H}, \quad (3.7)$$

де $\hbar = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ – постійна Планка, Дж·с [68];

ν – власна частота коливань молекули, Гц;

d – діаметр молекули, м;

m – маса молекули, кг;

V – швидкість навантаження породного масиву, м/с;

σ_p – межа міцності на розрив молекулярних зв'язків, Па;

H – загальне число атомів в упакованні кристалів середовища на площі породи 1 м^2 (порядку 10^{19} [69]), в. о.

У (3.7) потребує уточнення технологічний параметр - швидкість навантаження породного масиву V . Він дорівнює кореню з суми квадратів швидкості подачі V_n та різання V_r робочого інструменту. V_n та V_r визначають ступінь взаємодії передньої грані породоруйнуючого інструменту з гірським масивом через напрям руху результуючого вектора руйнування - кут φ , градус [70]:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{|v_n|}{|v_p|} \right), \quad (3.8)$$

де v_n – швидкість подачі, м/с;

v_p – швидкість різання, м/с.

Зміни в гірських породах, викликані перепадами температури, вивітрюванням, перерозподілом гірських навантажень, тектонічними рухами, насиченням чи втратою рідини, супроводжуються виникненням різного роду тріщин, розуцільненням та дилатансією (збільшення об'єму при деформації

зсуву). Характеристикою цих процесів є деформація зсуву. Тому, зроблено висновок, що у (3.7) не враховано деформацію зсуву ε ($\varepsilon=10^{-5}$, в. о. [71]).

Межа міцності на розрив σ_p , Па [72]:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot K}{\pi \cdot l_k}}. \quad (3.9)$$

В кристалічних решітках реальних кристалів існують лінійні дефекти – дислокації (додаткові кристалічні площини в кристалічних ґратках). Їх переміщення відбувається під дією напружень. Наявність дислокацій є передумовою появи тріщин [73]. Руйнування гірських порід в результаті росту тріщин відбувається наступним чином: у породі створюється об'єм з підвищеною концентрацією енергії. Цей об'єм розширюється, створює у породі розтягуючі напруження, під дією яких зростають тріщини і порода руйнується. Накопичена в породі потенційна енергія витрачається на утворення нових поверхонь та об'ємів. Створення у породі напружень розтягу спричиняє зростання тріщин [73]. Джерелом тріщин може бути механічна, теплова, електрична, хімічна дія тощо. У роботі дослідження адаптовані до джерела тріщин, що утворюються в масиві від дії імпульсних навантажень. Враховано наявність тріщин в породі через параметр l_k – критична довжина тріщини, м. В механіці руйнування довжина тріщини вважається критичною, якщо при її розвитку кількість виділеної пружної енергії більше кількості витрат енергії пластичної деформації [74].

$$l_k = \left(\frac{R}{[\sigma]} \right)^2, \quad (3.10)$$

де R – в'язкість руйнування, що характеризує пластичність матеріалу, Па $\cdot\sqrt{м}$;

$[\sigma]$ – тимчасовий опір руйнуванню, МПа.

Після узгодження (3.6) та (3.10) з (3.9), отримано, Па:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{4 \cdot c}{(c+1) \cdot a \cdot \pi \cdot l_k}} \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta. \quad (3.11)$$

Відмінність відомої [26] та запропонованої математичних моделей межі міцності на розрив молекулярних зв'язків полягає у тому, що в [26] не враховано фізичні параметри гірських порід (питому теплоємність плавлення матеріалу Q , густину ρ) та деструктивність порід. Остання виражається через довжину критичної тріщини l_k . За рахунок цього кінцевий результат розрахунку межі міцності на розрив міжмолекулярного зв'язку у порівнянні [26] зростає до 40 %.

Після узгодження (3.11) з (3.7), отримано, м:

$$\alpha_0 = \frac{\hbar^2 \cdot \nu^2 \cdot Na}{\pi \cdot d^2 \cdot m \cdot V^2 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot c}{(c+1) \cdot a \cdot \pi \cdot l_k}} \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta \cdot H}. \quad (3.12)$$

Залежність (3.12) відрізняється від (3.7) тим, що враховує фізичні та молекулярні параметри гірських порід – густину ρ , питому енергоємність плавлення Q , число простору решітки c , довжину критичної тріщини l_k , параметр кристалічної решітки a , товщину поверхневого шару матеріалу, число Авогадро ($Na=6,62 \cdot 10^{23}$, моль [75]) та кількість атомних шарів у поверхневому шарі матеріалу Z . Це дає змогу комплексно врахувати макро та мікро параметри, від яких залежить відстань дії молекулярних зв'язків α_0 .

Математична модель ППЕ після узгодження (3.6), (3.12) з (1.20), Дж/м²:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \hbar^4 \cdot \omega^4 \cdot l_k \cdot N_a^2}{Y_0 \cdot \pi^3 \cdot d^4 \cdot m^2 \cdot V^4 \cdot H^2 \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta}. \quad (3.13)$$

Для наближення математичної моделі ППЕ до реального процесу руйнування гірських порід запропоновано додатково урахувувати теоретичний технологічний коефіцієнт T_k , в. о. [89]:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \hbar^4 \cdot \omega^4 \cdot l_k \cdot N_a^2 \cdot T_k}{Y_0 \cdot \pi^3 \cdot d^4 \cdot m^2 \cdot V^4 \cdot H^2 \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta}; \quad (3.14)$$

$$T_k = \frac{\varepsilon^2 \cdot F^2 \cdot \sqrt{N_n^2 + N_p^2} \cdot t \cdot v \cdot s \cdot P_k \cdot \eta_n \cdot \arctg\left(\frac{|v_n|}{|v_p|}\right) \cdot K_{pk} \cdot F}{j \cdot P_{yn} \cdot \sqrt{M_n^2 + M_p^2} \cdot v_{np}}, \quad (3.15)$$

де ε – деформація зсуву, в. о.

F – коефіцієнт тертя породи об інструмент ($F=0,1$ [26])

N_n – потужність приводу подачі, Вт;

N_p – потужність приводу різання, Вт;

t – ширина ріжучої кромки, м;

v – коефіцієнт Пуассона, в.о.;

s – глибина руйнування породи, м;

P_k – контактна міцність породи, Па;

η_n – ККД двигуна, в.о.;

K_{pk} – кількість ріжучих кромок, шт.

j – відстань між ріжучими кромками, м;

P_{yn} – навантаження на робочий інструмент, Н;

M_n – крутний момент приводу подачі, Н·м;

M_p – крутний момент приводу різання, Н·м;

v_{np} – швидкість потоку промивної рідини, м/с.

За (3.14) з урахуванням (3.15) побудовано залежності ППЕ від швидкості різання породи та потужності приводу подачі для мергелю, граніту та гнейс представлені нижче.

На рис. 3.1 представлена залежність ППЕ від швидкості різання породи $\gamma=f(V_r)$. Вихідні параметри наведено в [89].

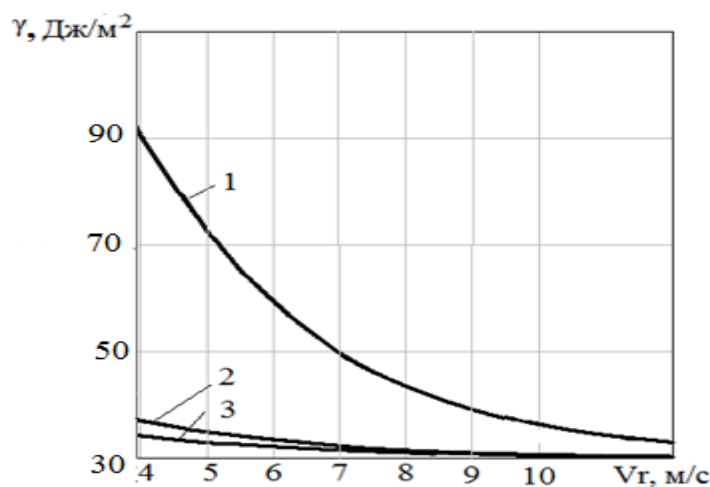


Рисунок 3.1 – Залежність питомої поверхневої енергії від швидкості різання породи $\gamma=f(V_r)$ (1 – гнейс, 2 – мергель, 3 – граніт)

Залежність $\gamma=f(V_r)$ є спадною функцією. Це пояснюється кінетичною природою руйнування [11]. Тобто, при збільшенні швидкості різання зростає сила тертя, а відповідно і температура гірської породи. На молекулярному рівні у цей час підвищується власна частота коливань. Це викликає локальні напруження, що можуть сягати значень співрозмірних з межею міцності зв'язків на розрив або наближатися до них. З аналізу залежностей (рис. 3.1) це відбувається при швидкості 8 м/с, коли тангенс кута дотичної до кривої зменшується на 40 %. Тобто, відбувається зростання енергії активації процесу знеміцнення. За рахунок цього утворення одиниці площі нової поверхні проходить з меншими витратами енергії. Цей процес характеризується залежністю зміни ППЕ від швидкості руйнування, що представлена на рис. 3.1.

На рис. 3.2 представлена залежність ППЕ від потужності приводу $\gamma=f(Nn)$. Вихідні параметри наведено в [89].

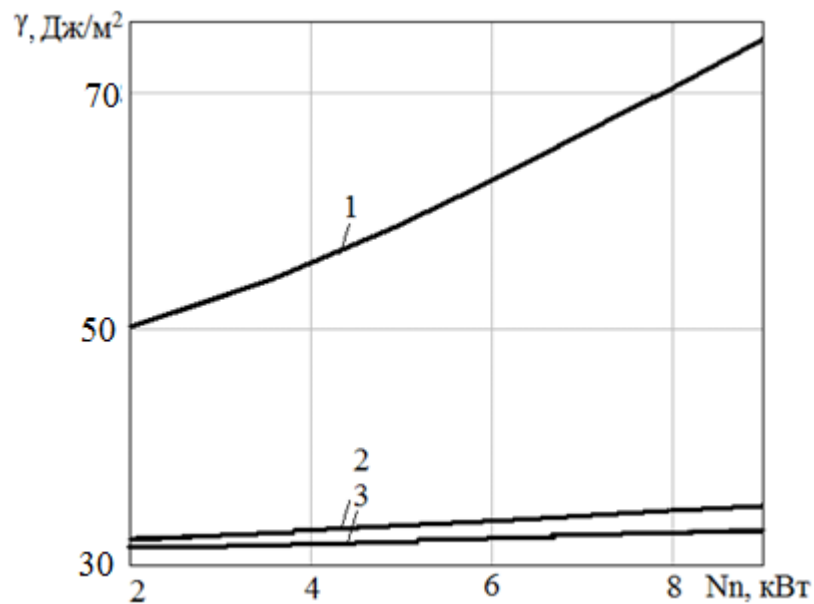


Рисунок 3.2 - Залежність ППЕ від потужності приводу подачі $\gamma=f(N_n)$ (1 – гнейс, 2 - мергель, 3 – граніт)

При руйнуванні гірської породи частина енергії приводу іде на формування ядра ущільнення. При цьому ППЕ накопичується у якості потенційної енергії в масиві. Тому залежність $\gamma=f(N_n)$ є зростаючою функцією.

На базі (3.13) створено математичну модель ППЕ, що залежить від зміни режиму гідрокавітаційного навантаження з МІФКП. Останній визначається геометричними параметрами кавітатора та магнітною індукцією всередині кавітатора робочого органу, B , Тл [76]:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{L_k}, \quad (3.16)$$

де $\mu_0=1,257 \cdot 10^{-6}$ – магнітна постійна, Н/А² [77];

I – сила струму, А;

N – кількість витків у обмотці, шт.;

L_k – довжина котушки, м.

Від значення магнітної індукції у кавітаторі залежить частота прецесії кавітаційного потоку Ω , Гц [20]:

$$\Omega = \varsigma \cdot B, \quad (3.17)$$

де ς – гіромагнітне відношення, А·с/кг.

Гіромагнітне відношення являє собою відношення магнітного до механічного моменту частки, Гц/Тл [20]:

$$\varsigma = g_{\text{ч}} \cdot \frac{\mu_b}{\hbar} = 2 \cdot \frac{927,4 \cdot 10^{-26}}{6,6256 \cdot 10^{-34}} = 2,8 \cdot 10^{10}, \quad (3.18)$$

де $g_{\text{ч}}$ – чинник, в.о. (g- фактор);

$\mu_b = 927,4 \cdot 10^{-26}$ – магнетон Бора, Дж/Тл [78];

$\hbar = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ – постійна Планка, Дж·с [68].

$g_{\text{ч}}$ – чинник дорівнює 1, якщо в прецесії беруть участь тільки орбітальні моменти електронів і $g_{\text{ч}}$ – чинник дорівнює 2, якщо прецесують тільки власні магнітні моменти електронів [20]. В умовах даного дослідження має місце другий випадок.

Після підстановки (3.16), (3.18) в (3.17) отримано нову математичну модель частоти прецесії магнітного потоку, Гц:

$$\Omega = g_{\text{ч}} \cdot \frac{\mu_b}{\hbar} \cdot \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{L_k} = \frac{K_{\text{ем}} \cdot I \cdot N}{L_k} \quad (3.19)$$

Для спрощення математичних розрахунків частоти прецесії кавітаційного потоку, добуток постійних складових (3.19) замінено на електромагнітний коефіцієнт $K_{\text{ем}}$, м/Кл.

$$K_{\text{ем}} = \varsigma \cdot \mu_0 = 2,8 \cdot 10^{10} \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} = 3,5 \cdot 10^4. \quad (3.20)$$

Розрахункове значення частоти прецесування кавітаційних каверн, згідно (3.19), знаходиться в межах ($10^8 \dots 10^9$) Гц.

У результаті аналізу вище перелічених моделей даного розділу та на базі (3.13) розроблено математичну модель ППЕ при руйнування гірських порід з гідрокавітаційним навантаженням з МІФКП.

$$\gamma = \frac{2 \cdot \hbar^4 \cdot \omega^4 \cdot l_{kp} \cdot N_a^2}{Y_0 \cdot \pi^3 \cdot d^4 \cdot m^2 \cdot V^4 \cdot H^2 \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta \cdot \zeta \cdot l_\partial \cdot B}. \quad (3.21)$$

Вона відрізняється тим, що ураховує молекулярні (діаметр, масу молекули, власну частоту коливань молекули у кристалічній структурі), фізичні (питому теплоту плавлення, густину) та технологічні параметри (довжину та магнітну індукцію всередині кавітатора робочого органу, швидкість потоку промивної рідини). Зміна останніх дала змогу керувати значенням питомої поверхневої енергії при різних режимах обертово-гідрокавітаційного руйнування з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку. Експериментальна перевірка цього наведена у розділі 4.

3.2 Енергоємність руйнування гірських порід

На першому етапі досліджень визначено енергоємність руйнування гірських порід E_p при гідрокавітаційному навантаженні. Для цього прийнята базова модель, Дж/м³ [79]:

$$E_p = \frac{4}{\pi \cdot D_0^2 \cdot \Delta S} \cdot (U \cdot I \cdot t + p \cdot \Delta S), \quad (3.22)$$

де U – напруга мережі, до якої приєднаний привід обертача робочого інструменту, В;

I – сила струму в мережі, до якої приєднаний привід обертача робочого інструменту, А;

t – тривалість руйнування породи, с;

p – тиск на вибій, Па;

ΔS – глибина свердловини (шпура) за тривалість t , м;

D_0 – діаметр свердловини, м.

При аналізі фізичного змісту (3.22) встановлено, що для узгодження розмірностей лівої та правої частин рівняння, доцільно урахувати у другому доданку параметр площі. Таким параметром є контактна площа інструменту та поверхні гірської породи S_{in} . Тому що об'єм породи, який піддається деструкції характеризується контактною площею помноженою на глибину руйнування, відповідно. У результаті, (3.22) приймає вигляд, Дж/м³:

$$E_p = \frac{4}{\pi \cdot D_0^2 \cdot \Delta S} \cdot (U \cdot I \cdot t + p_3 \cdot \Delta S \cdot S_{in}), \quad (3.23)$$

де p_3 – тиск на виході дифузору у розрізі 3^I-3^{II} (рис. 3.3), Па;

S_{in} – контактна площа інструменту та гірської породи, м².

Залежності (3.24 – 3.34) прийняті з урахуванням [59, 80-81].

Проведені розрахунки дозволили уточнити форму ріжучого інструменту. На рис. 3.5 представлено кавітаційний різець з умовними позначеннями параметрів для визначення швидкостей рідини, гідравлічних опорів та тисків у його дифузорі.

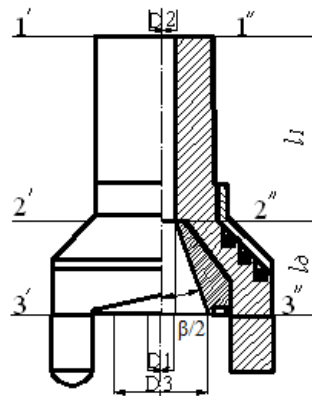


Рисунок 3.5 - Кавітаційний різець з умовними позначеннями параметрів для визначення швидкостей рідини та тисків у дифузорі різця кавітаційного

Тиск, створюваний насосом дорівнює p_1 , та зміна тиску в дифузорі при зміні кута його розкриття Δp та тиски у перерізах 2-2^I та 3-3^I (рис. 3.5) - p_2, p_3 , відповідно, Па:

$$\Delta p = p_3 - p_2; \quad (3.24)$$

$$p_2 = p_1 - h_1 \cdot \rho \cdot g; \quad (3.25)$$

$$p_3 = \rho \cdot g \cdot \left(\frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{(v_{cp2}^2 - v_{cp3}^2)}{2 \cdot g} - h_4 \right), \quad (3.26)$$

де h_1, h_4 – втрати напору на тертя у лінійній ділянці та у дифузорі різця кавітаційного, відповідно, м;

ρ – густина промивної рідини, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$v_{cp1}, v_{cp2}, v_{cp3}$ – швидкості потоку промивної рідини через дифузор різця кавітаційного у перерізах 1-1^I, 2-2^I та 3-3^I, відповідно, м/с.

Швидкості потоку промивної рідини через дифузор різця кавітаційного у перерізах 1-1^I, 2-2^I та 3-3^I, м/с:

$$v_{cp1} = v_{cp2} = A_n / S_1 = (A_n \cdot 4) / (\pi \cdot D_1^2); \quad (3.27)$$

$$v_{cp3} = A_n / S_3 = (A_n \cdot 4) / (\pi \cdot D_3^2) = (A_n \cdot 4) / (\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot (l_d \cdot \operatorname{tg}(\beta / 2)))^2) \quad (3.28)$$

де A_n – продуктивність насосу, м³/с;

S_1, S_2, S_3 – площі перерізів дифузору різця кавітаційного у перерізах 1-1^I, 2-2^I та 3-3^I, відповідно, м²;

D_1, D_2, D_3 – діаметри перерізів різця кавітаційного у перерізах 1-1^I, 2-2^I та 3-3^I, відповідно, м;

l_d – довжина дифузору різця кавітаційного, м;

β – кут розкриття дифузора, градус.

Втрати на тертя у лінійній ділянці та у дифузорі різця кавітаційного h_l , h_4 , м:

$$h_1 = \lambda \cdot \left(\frac{l_1}{D_1} \right) \cdot \left(\frac{V_{cp1}^2}{2 \cdot g} \right); \quad (3.29)$$

$$h_4 = \xi_4 \cdot \frac{v_{cp3}^2}{2 \cdot g}, \quad (3.30)$$

де λ – коефіцієнт Дарсі, в. о.;

l_1 – відстань між перерізами (1-1^I) – (2-2^I), м;

ξ_4 – коефіцієнт опору дифузору, в.о.

$$\xi_4 = \left(\frac{\lambda}{8 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) + \sin(\beta) \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \right), \quad (3.31)$$

де n – ступінь розширення дифузора, в.о.

Ступінь розширення дифузору (в. о.) та число Рейнольдса (в. о.):

$$n = S_3 / S_2 = D_3^2 / D_2^2; \quad (3.32)$$

$$Re = V_{cp1} \cdot \left(\frac{D_1}{\nu_p} \right), \quad (3.33)$$

де ν_p – кінематична в'язкість рідини (для води $\nu=1 \cdot 10^{-6}$ [82]), м²/с.

Як вказано вище, для виникнення кавітації необхідно забезпечити виконання умови: $Re > 7340$ [58]. Згідно з [83], при $2300 < Re < 10^5$, коефіцієнт Дарсі визначають за формулою Блазіуса (для турбулентного режиму руху рідини), в. о.:

$$\lambda = 0,3164 / \sqrt[4]{Re}. \quad (3.34)$$

На базі досліджень [59, 80-81] отримано математичну модель енергоємності руйнування гірських порід з гідрокавітаційним навантаженням через урахування геометричних параметрів кавітатора, Дж/м³:

$$E_p = \frac{4}{\pi \cdot D_0^2 \cdot \Delta S} \cdot (U \cdot I \cdot t + \Delta S \cdot S_{in} \cdot \left((p_1 - h_1 \cdot \rho \cdot g) + \rho \cdot \frac{V_{cp2}^2}{2} - \right. \\ \left. - \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot An}{\pi \cdot \left(D_1 + 2 \cdot l_\partial \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) \right)^2} \cdot (1 - \xi_4) \right) \right) \quad (3.35)$$

У табл. 3.1 наведені вихідні дані для розрахунку енергоємності руйнування гірських порід. На рис. (3.6-3.7) представлені залежності енергоємності руйнування гірських порід різцем кавітаційним від кута розкриття та довжини дифузору l_∂ .

Таблиця 3.1 - Вихідні дані для розрахунку енергоємності руйнування

Назва, значення та одиниці вимірювання вихідного параметру	Назва, значення та одиниці вимірювання вихідного параметру
1	2
1. Діаметр свердловини $D_0=0,05$ м	6. Коефіцієнт Дарсі $\lambda=0,026$ [порах. з 3.34], в. о.
2. Глибина свердловини породи $\Delta S=0,1$ м	7. Довжина прямолінійної та дифузornoї ділянки різця кавітаційного $l_I=0,3$ м, та $l_\partial=0,15$, рис. 3.5. (при $\beta=\text{var}$), м,
3. Напруга та струм в мережі змінного струму $U=220$ В, $I=5$ А	8. Швидкість рідини у перерізі 2^I-2^{II} $V_{cpI}=V_{cp2}=1,18$ м/с
4. Час руйнування $t=3600$ с	9. Густина $\rho=1015$ кг/м ³ [59]
5. Початковий тиск та витрати насоса $p_I=12$ МПа, $Q=0,0003$ м ³ /с	10. Діаметр критичного перерізу дифузору 2^I-2^{II} $D_I=D_2=0,01$ м

З (3.26) та за вихідними даними табл. 3.1 $Re=21240>7340$. Умова виникнення кавітації за критерієм число Рейнольдса – виконується. За розробленою математичною (3.35) побудовано залежність енергоємності

руйнування гірських порід різцем кавітаційним від кута розкриття та довжини дифузору, рис.3.6 та 3.7.

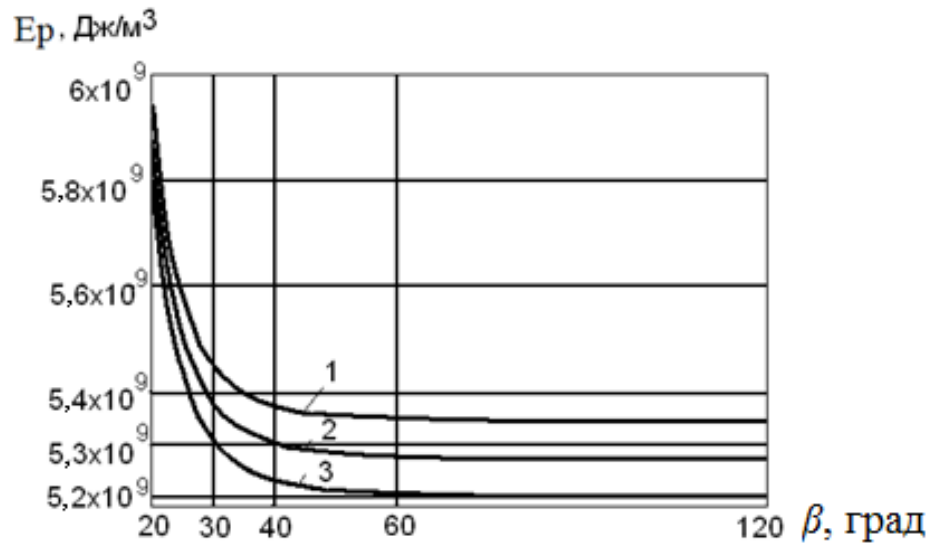


Рисунок 3.6 - Залежність енергоємності руйнування гірських порід різцем кавітаційним від кута розкриття дифузору (1 – при $p_I=0,25$ МПа; 2 – при $p_I=0,30$ МПа; 3 – при $p_I=0,35$ МПа)

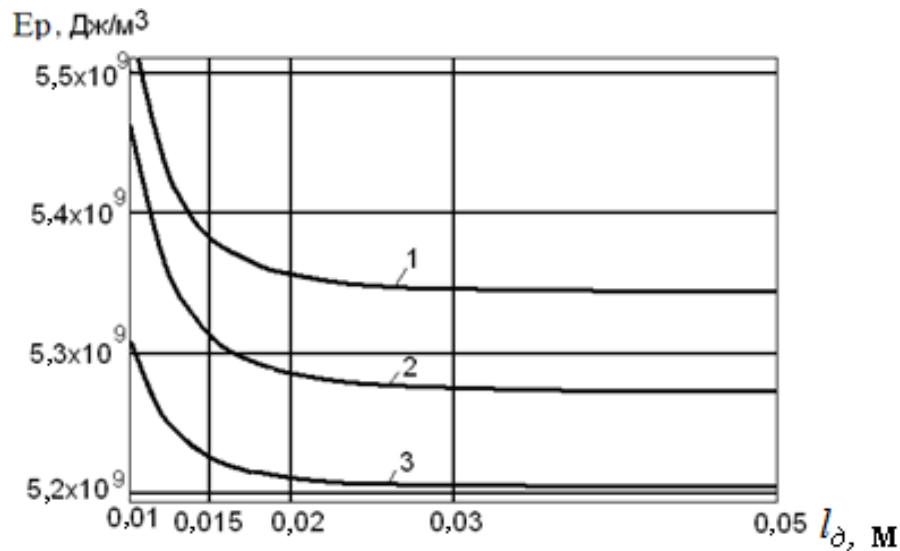


Рисунок 3.7 – Залежність енергоємності руйнування гірських порід різцем кавітаційним від довжини дифузору (1 – при $p_I=0,25$ МПа; 2 – при $p_I=0,30$ МПа; 3 – при $p_I=0,35$ МПа)

Залежності енергоємності руйнування гірських порід кавітаційним різцем від кута розкриття та довжини дифузору мають спадний характер. Це пов'язано з тим, що в кавітаційних бульбашках сконцентровано локальні імпульси тиску

на вибій, які досягають 10^3 МПа [18]. При цьому кавітаційне навантаження сприяє утворенню на його поверхні додатково внесеної технологічної тріщинуватості. Таке комбіноване механіко-гідрокавітаційне навантаження знижує енергоємність руйнування з $5,9 \cdot 10^9$ до $5,2 \cdot 10^9$ Дж/м³. При заданих початкових умовах енергоємність спадає до значення кута розкриття $\beta=60^\circ$ та довжини $l_0=0,03$ м дифузору. Далі, залежність приймає лінійний характер. Це пов'язано з тим, що при $\beta=60^\circ$ та $l_0:D_0=5:3$ кавітаційний процес згенерований різцем кавітаційним набуває максимуму автоколивань. Останні мають субрезонансну частоту до власної частоти коливань молекулярної структури гірських порід.

Аналіз отриманих залежностей показав доцільність виконання різців кавітаційних з кутом розкриття дифузору 60° та з відношенням довжини дифузору до діаметру критичного перерізу 5:3.

3.3 Геометричні та частотні параметри кавітаційної зони

Для визначення довжини кавітаційної зони наведена розрахункова схема представлена на рис. 3.8:

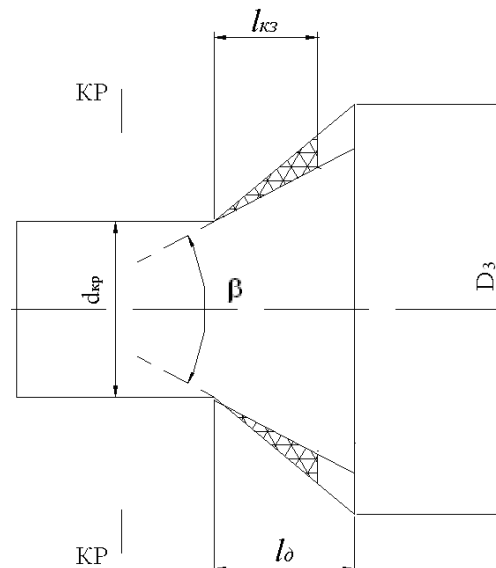


Рисунок 3.8 – Розрахункова схема для визначення довжини кавітаційної зони

Довжина кавітаційної зони $l_{кз}$, м [58, 84]:

$$l_{кз} = \frac{d_{кр}}{2 \operatorname{tg}(\beta/2)} \cdot \left(\sqrt{\frac{\mu}{1 - \sqrt{(1-\tau)/\psi}}} - 1 \right), \quad (3.36)$$

де μ – коефіцієнт витрати дифузору кавітатора, в. о. ($\mu=0,82$ [85]);

τ – параметр (число) кавітації, в.о.;

$\psi = 1,1$ – коефіцієнт повноти удару на миттєве розширення потоку [86].

Число кавітації, в.о. [58]:

$$\tau = \frac{2 \cdot (p_3 - p_2)}{\rho \cdot V_{cp1}^2}. \quad (3.37)$$

На рис. 3.9 представлена залежність довжини кавітаційної зони від довжини дифузору.

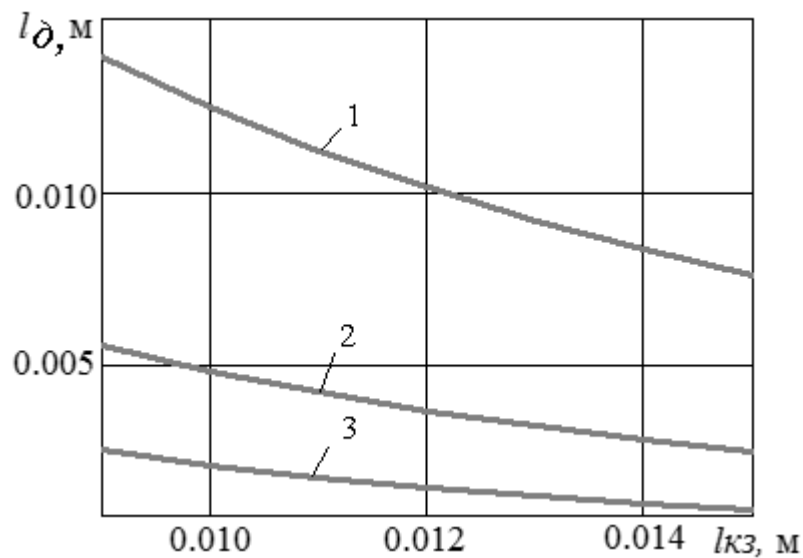


Рисунок 3.9 – Залежність довжини кавітаційної зони від довжини дифузору (1 – при $\beta = 30^\circ$; 2 – при $\beta = 45^\circ$; 3 – при $\beta = 60^\circ$.)

Залежність довжини кавітаційної зони від довжини дифузору має спадний характер. Пояснюється тим, що при збільшенні довжини дифузору, зростає гідравлічний опір. Це впливає з аналізу (3.31) – (3.32). Тому енергія кавітаційних каверн починає концентруватися біля критичного перерізу D_{kp} (рис.3.8).

Частота кавітації у дифузори різця кавітаційного, Гц [85]:

$$f_{\partial} = Sh_M \cdot \frac{V_{cp1}}{l_{k3}}, \quad (3.38)$$

де Sh_M – модифіковане число Струхаля, в.о. [85].

$$Sh_M = (1/\sqrt{\mu}) \cdot \operatorname{tg}(\beta/2). \quad (3.39)$$

У табл. 3.2 представлені частоти гідрокавітаційного генератора в залежності від зміни довжини та кута розкриття дифузору.

Таблиця 3.2 – Частота гідрокавітаційного генератора в залежності від зміни довжини та кута розкриття дифузору, Гц

Довжина дифузору l_{∂} , м	Кут розкриття дифузору β , градус		
	30^0	45^0	60^0
0,009	713	1884	3518
0,012	776	1832	3135
0,015	789	1699	2761

З аналізу табл. 3.2 зроблено висновок, що максимальне значення частоти автоколивань гідравлічної кавітації, з урахуванням усіх початкових технологічних обмежень та вихідних даних, досягається при найбільшому куті розкриття 60^0 . Це пояснюється тим, що при таких умовах збільшується перепад

тисків у дифузорі, як результат, зростає напруження розтягу у рідині та частота зриву потоку.

Висновки

1. Вперше розроблено математичну модель управління ППЕ гірських порід на молекулярному рівні, яка відрізняється від відомих тим, що дозволяє врахувати:

- молекулярні параметри породи: власну частоту коливань, діаметр, масу молекули;
- властивості породи: питому теплоємність плавлення, густину;
- швидкість потоку промивної рідини, магнітну індукцію всередині кавітатора робочого інструменту, дожину кавітатора.

2. Досліджені залежності енергоємності руйнування від кута розкриття і довжини дифузора різця кавітаційного. Визначено, що при куті розкриття 60° і довжині дифузора 0,03, енергоємність знижується на в межах $(5,9 \cdot 10^9 \dots 5,2 \cdot 10^9)$ Дж/м³. Тому, рекомендується виконувати різці з кутом розкриття 60° і з відношенням довжини дифузора до діаметру критичного перерізу 5:3.

3. Залежність довжини кавітаційної зони від довжини дифузору має спадний характер. Пояснюється тим, що при збільшенні довжини дифузору, зростає гідравлічний опір. Максимальне значення частоти автоколивань гідравлічної кавітації 3518 Гц, з урахуванням усіх початкових технологічних обмежень та вихідних даних, досягається при куті розкриття - 60° .

4. Результати досліджень по створенню нової математичної моделі управління питомою поверхневою енергією руйнування гірських порід опубліковані у [87 – 89]. Визначення частотних параметрів руйнування з гідрокавітаційним навантаженням з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку викладені в [90]. Залежність питомої енергоємності руйнування гірських порід від геометричних параметрів різця кавітаційного при механіко-гідрокавітаційному способі представлені в [91].


РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТОМОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ РУЙНУВАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД З МАГНІТНО-ІНДУКЦІЙНИМ ФОКУСУВАННЯМ КАВІТАЦІЙНОГО ПОТОКУ




4.1 Вибір і підготовка зразків гірських порід

Розроблений обертово-гідрокавітаційний спосіб руйнування з МІФКП забезпечує прецесування кавітаційних бульбашок за ларморовим колом. При цьому частота коливань бульбашок наближається до власної частоти коливань кристалічної структури гірських порід. Це сприяє руйнуванню їх молекулярних зв'язків. Крім того, локальні схлопування кавітаційних бульбашок викликають утворення штучної тріщинуватості у гірських породах та зниження ППЕ. Для експериментальної перевірки зміни ППЕ під дією гідрокавітаційного навантаження з МІФКП обрано зразки гірських порід з різними фізичними властивостями та широким мінеральним складом: граніт, гнейс, вапняк, пісковик. Основні фізичні властивості порід, які впливають на процес руйнування представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні фізичні властивості та фото зразків обраних видів гірських порід

Порода	Модуль пружності І роду, ГПа [92]	Категорія за шкалою Протодьяконова, в.о. [92]	Походження	Фото зразка Циліндр, діаметр – 5 см, Висота – 1,5 см
1	2	3	4	5
Граніт	100-450	8-15	Магматична інтрузивна	

Закінчення табл. 4.1

1	2	3	4	5
Гнейс	40-220	2-3	Метаморфічна	
Вапняк	250-600	2-15	Осадова	
Пісковик	30-260	2-15	Осадова	

Зразки, обраних видів гірських порід, підготовані у вигляді циліндрів діаметром 5 см та висотою 1,5 см. Вони виготовлені з кернів отриманих з Капустинського, Язівського та Мелихівського родовищ. Зразки порізані за допомогою станка LZS — 2 [93]. Також проведено шліфування та полірування їх верхніх площин, за допомогою станка QM300X110 [94].

Перший зразок - магматична кварцовмісна порода – граніт. Кварц (SiO_2) є найпоширенішим мінералом земної кори, частка якого складає 75 % [95]. Запаси граніту сягають близько 100 млн. м^3 в Україні. Річний видобуток – біля 40 тисяч м^3 в рік [96]. Відноситься до гранітів Капустинського родовища у Кіровоградській області. Характеристиками цих гранітів є водопоглинання – 0,21 %, щільність 2630 кг/м^3 , межа міцності при стисненні (72...124) МПа [97]. За результатами хімічного аналізу виконаного за допомогою електронного пристрою Selmi РЭМ 106 И (додаток Е), зразок граніту на 57 % складається з кремнію, 18 % алюмінію, 15 % феруму та 9 % кальцію і має середньозернисту структуру. До складу входять мінерали кварцу, слюди та польового шпату.

Зерна кварцу мають тригональну сингонію. Кристалічна структура – псевдо гексагональна. Щільність (2600...2650) кг/м³. Має кубічну граньоцентровану кристалічну решітку з недосконалою спайністю [98-99].

Польовий шпат у даному зразку граніту представлений сульфідним січано-ферумним з'єднанням гідротермального походження. Має досконалу спайність по двом напрямкам за індексами Міллера [001] та [010]. Для нього характерне кубічне та гексагональне упакування іонів сірки, між якими розміщені іони феруму. Досить поширений у природі – 0,15 % маси усієї земної кори. Температура плавлення знаходиться у межах (973...1473) К, щільність (4800...4900) кг/м³ [98, 100]).

Слюда даного граніту має дуже досконалу спайність. На основі хімічного аналізу, за попередніми припущеннями, відноситься до групи магнезійно-залізистих слюд і представлена мінералом біотитом. Розщеплення проходить по площині спайності з індексом Міллера [001]. Щільність (2800...3400) кг/м³. [101].

Другий зразок - метаморфічна сланцева порода – гнейс. В Україні використовується, в основному, для виробництва щебню, бута, облицювального каменю, мощення доріг. За складом близький до граніту. Тобто, складений з кварцу, польового шпату, кольорових мінералів (біотиту, авгіту, рогової обманки, піроксена тощо) [102]. За результатами хімічного аналізу (додаток Е) даний зразок гнейсу на 66 % складається з кремнію, 15 % сірки та 15 % заліза, решта домішок – кальцій та алюміній. Складається з мінералів кварцу, слюди та польового шпату.

Ще один зразок – вапняк. Його поклади зустрічаються у всіх геологічних системах — від докембрійських до четвертинних. Масова частка серед осадових порід складає в середньому (19...22) % [103]. Балансові запаси вапняку в Україні становлять близько 2.5 млрд. т [96]. З результатів хімічного аналізу (Додаток Е): вапняк складається на 90 % з кальцію, решту складають домішки сірки, фосфору, алюмінію та кремнію. Підвищений вміст кальцію у

зразку визначає досконалу спайність, що супроводжується раковидним зломом при руйнуванні.

Останній зразок – пісковик. Входить до групи облицювальних каменів. Запаси в Україні – близько 150 млн. т. Виробуток - 2500 тис. т в рік [104].

Усі (окрім вапняку) обрані види гірських порід для дослідження є полімінеральними і мають різні деформаційні та міцнісні характеристики у залежності від хімічного та відсоткового складу, як видно з табл. 4.1.

4.2 Створення експериментального стенду

Експериментальний стенд для дослідження зміни ППЕ під дією гідрокавітаційного навантаження з МІФКП представлений на рис. 4.1. Розроблений за схемою представленою на рис. 2.1.

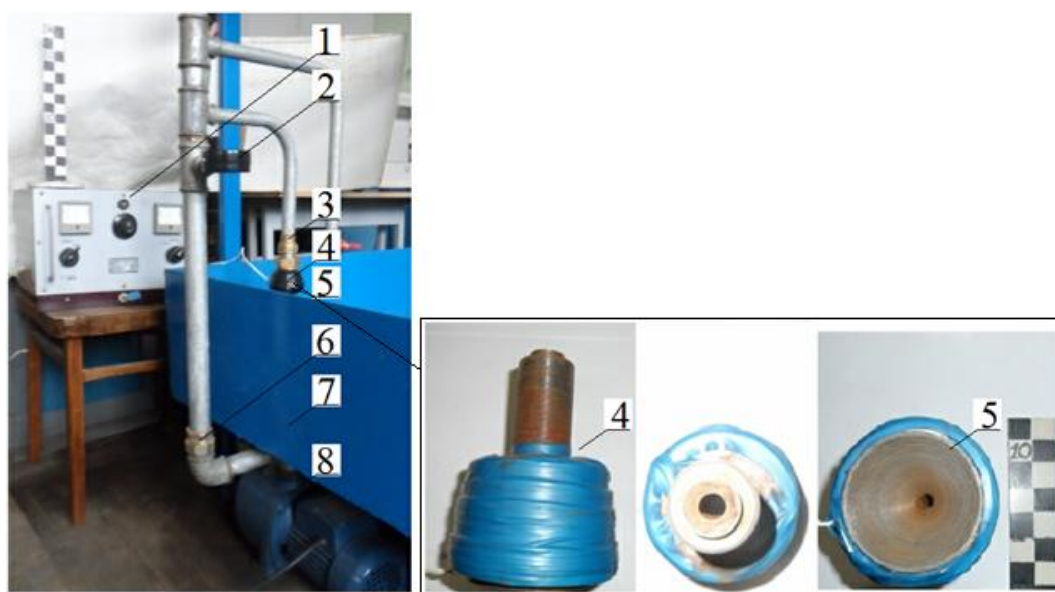


Рисунок 4.1 – Схема експериментального стенду по дослідженню зміни ППЕ гірських порід при обробці гірських порід гідрокавітаційним навантаженням з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку: 1 – випрямляч ВСА-5К; 2 – манометр ДМ 05063; 3 – муфта; 4 – кавітатор; 5 – обмотка індуктивності постійного струму; 6 – трубопровід; 7 – резервуар; 8 – відцентровий насос JEX 500.

Ослаблення гірських порід та, як наслідок, зниження модуля пружності І роду і ППЕ, відбувається за рахунок дії кавітаційного потоку. Останній утворюється у кавітаторі 5 (рис. 4.1) при проходженні рідини через промивний канал з дифузorzом. Фото кавітаторів представлено на рис. 4.2.



Рисунок 4.2 – Кавітатори а – №1; б – №2; в – №3

Геометричні параметри кавітаторів занесені у табл. 4.2

Таблиця 4.2 - Геометричні параметри кавітаторів

Номер кавітатора	Довжина дифузора l_0 , мм	Діаметр критичного перерізу кавітатора D_1 , мм	Діаметр виходу дифузору кавітатора D_3 , мм	Кут розкриття β , градус
1	2	3	4	5
№ 1	10	9	20	60
№ 2	30	9	45	60
№ 3	50	9	70	60

На рис. 4.2 а на кавітаторі № 1 розміщена обмотка, яка забезпечує фокусування кавітаційного потоку. При під'єднанні її до мережі постійного струму у кавітаторі виникає постійне магнітне поле. Домішки води (газові бульбашки, зважені та іонізовані частинки, включення інших рідин тощо), навколо яких утворюються кавітаційні каверни [105], рухаються у магнітному полі зі швидкістю \vec{v} , м/с. Вектор ліній магнітної індукції \vec{B} , Тл співпадає з напрямком руху рідини у кавітаторі. \vec{v} розкладається на дві складові: паралельну магнітному полю v_{\parallel} та перпендикулярну v_{\perp} . За першою складовою домішки з кавітаційними бульбашками рухаються поступально вздовж \vec{B} . За другою складовою вони рухаються з гвинтоподібним характером (прецесують) за ларморовим колом [105]. Обмотка виконана так, що \vec{B} зростає у напрямку виходу кавітатора у межах (10...50) мТл. Домішки разом з кавітаційними бульбашками фокусуються навколо ліній магнітної індукції. Це відбувається, завдяки дії сили Лоренца, що лежить у площині перпендикулярній \vec{B} . При цьому, згідно (3.17) частота прецесії кавітаційного потоку за ларморовим колом сягає радіодіапазону (0,1...1) ГГц. Це створює субрезонансне частотне навантаження до власної частоти коливань кристалічної структури гірських порід.

4.3 Перевірка умови виникнення кавітації

Необхідними умовами для виникнення режиму кавітації є [83, 106]:

- наявність центрів пароутворення у промивній рідині;
- досягнення промивною рідиною температури або тиску насичення.

За першою умовою, центрами пароутворення є домішки різного характеру, наприклад: іони заліза, кальцію, магнію, газові бульбашки тощо [107]. Вони завжди присутні у промивній рідині (буровому розчині).

Друга умова виконується при проходженні промивної рідини через місцеве звуження, яким є промивний канал кавітатора. При цьому відбувається зростання швидкості потоку, що супроводжується зниженням тиску рідини до

стану насичення. Значення температури промивної рідини в умовах експерименту 293 К. Тиск насиченої пари, що відповідає даній температурі – 0,023 МПа [106]. Це означає, що тиск на виході промивного каналу повинен бути не вище 0,023 МПа. Нижче наведено перевірку виконання поставлених умов досягнення кавітаційного режиму. Для характеристики режиму кавітації обрано безрозмірний параметр – число кавітації τ (3.39), в. о. Згідно [107, 108], початок кавітаційного режиму характеризується критичним числом кавітації $\tau_{кр}$, в. о. Необхідною умовою перебігу кавітаційного процесу є $\tau \leq \tau_{кр}$.

Урахування впливу кута розкриття та довжини дифузору кавітатора відбувається через число кавітації, що характеризує відношення абсолютного тиску насиченої пари до тиску на вході і виході з дифузору [107], в. о.

$$\tau = \frac{2 \cdot (P_1 - P_{nn})}{\rho \cdot v_1^2}; \quad (4.1)$$

$$\tau_{кр} = \frac{2 \cdot (P_1 - P_{кр})}{\rho \cdot v_1^2}, \quad (4.2)$$

де P_1 та v_1 – абсолютний тиск та швидкість у незбуреному потоці, відповідно, Па та м/с;

P_{nn} – тиск насиченої пари при даній температурі, Па;

ρ – густина промивної рідини, кг/м³;

$P_{кр}$ – абсолютний тиск у місцевому звуженні кавітатора, Па.

Абсолютний тиск у трубопроводі перед кавітатором P_1 вимірювався за показами манометра ДМ 05063 (рис. 4.1). Швидкість потоку $v_{ср1}$ визначалась з урахуванням паспортних даних насоса JEX 500 (рис. 4.1) та геометричних параметрів трубопроводу експериментального стенду. Абсолютний тиск у промивному каналі кавітатора $P_{кр}$ визначався з урахуванням P_1 та v_1 за допомогою комп'ютерного модулю Solid Works (*Product: SolidWorks EDU Edition 2009-2010-NETWORK, Serial Number 9713048193256. Account Name: Kyiv Politechnic Institute*). Перевагою використання Solid Works є можливість

дослідження зміни тиску та швидкості не у одній конкретній точці промивного каналу, а по всій довжині кавітатора, рис. 4.3.

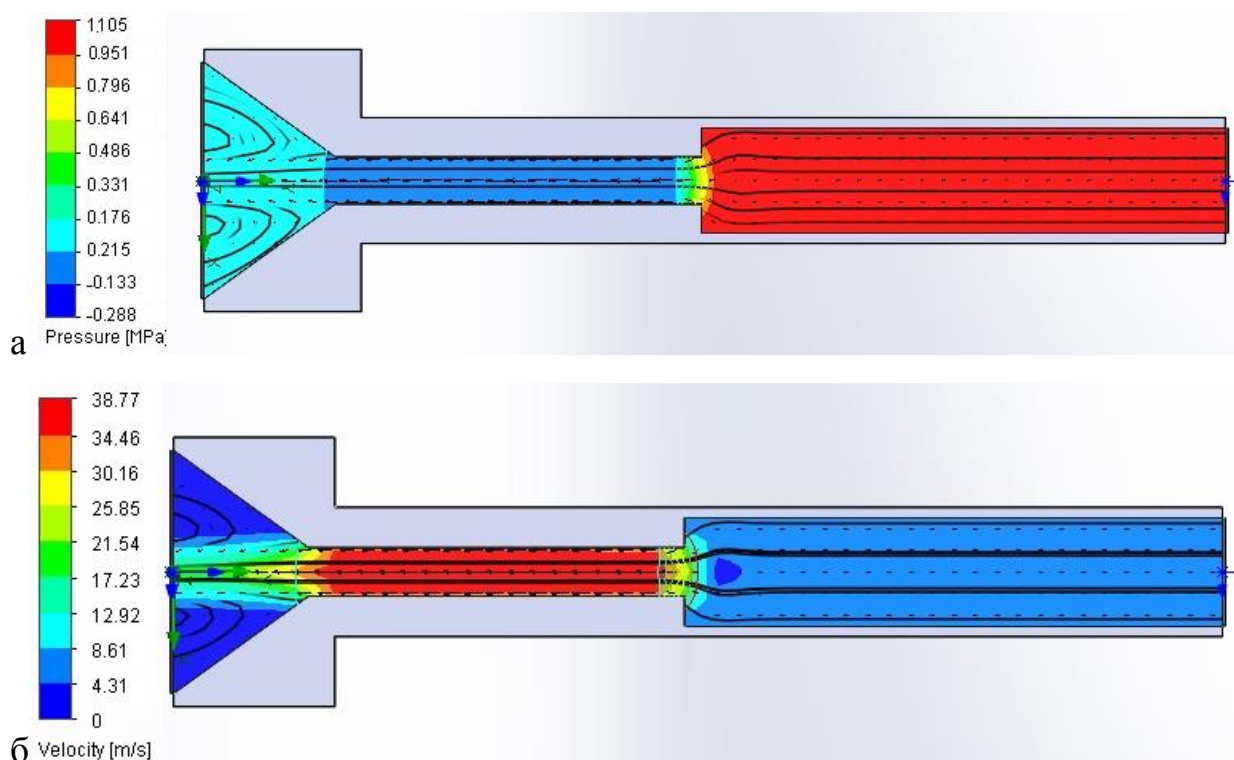


Рисунок 4.3 – Віртуальне зображення розрізу кавітатора з вказанням: а – перепаду тисків; б – швидкості промивної рідини

На рис. 4.3 а та 4.3 б рівень тиску та швидкості представлені відповідним кольором на легенді, з якої визначається значення в МПа або м/с, відповідно. З цього отримано, що $P_I=0,10$ МПа, $P_{кр}=0,02$ МПа, $v_I=14$ м/с.

Таким чином, з (3.39) та (4.1) визначено, що $\tau=0,786$, а $\tau_{кр}=0,801$. Тобто, досягнуто кавітаційного режиму згідно умови представленої вище.

4.4 Вплив гідрокавітаційного навантаження на модуль пружності I роду гірських порід

Досліджено модуль пружності першого роду E (надалі модуль пружності) кожного з зразків до і після експерименту. Для цього використано пристрій «Мікрон Гамма», який дозволяє на основі діаграм навантаження отримувати

значення E . Обґрунтування вибору пристрою та основні характеристики наведені у розділі 2.

Діаграми навантаження зразків обраних видів гірських порід та результати їх програмної обробки представлені на рис. 4.4, 4.5 та у додатках Ж-Н, П. Умовні позначення на рис. 4.4 – 4.5 наступні: № - порядковий номер вдавлювання; P – навантаження, г; T – час втримання зразку під навантаженням, с; h_1 – глибина занурення індентора при максимальному навантаженні, мкм; h_2 – глибина занурення після зняття навантаження, мкм; h_c мкм; H (Мартел) – твердість по Мартелу, МПа; H (Мейер) – твердість по Мейеру, МПа; E – модуль пружності, ГПа; $A_{об}$ – робота витрачена на подолання опору матеріалу, Дж; $A_{уп}$ – робота пружно-пластичних деформацій, Дж; $s_{(пласт)}$ – коефіцієнт пластичності, в. о.; $K_{пласт}$ – коефіцієнт пластичності матеріалу, в.о.; D – максимальне відхилення значень вище перелічених фізичних величин у дійсних одиницях; M – середньостатистичне значення вище перелічених фізичних величин у дійсних одиницях, “%” – похибка, %.

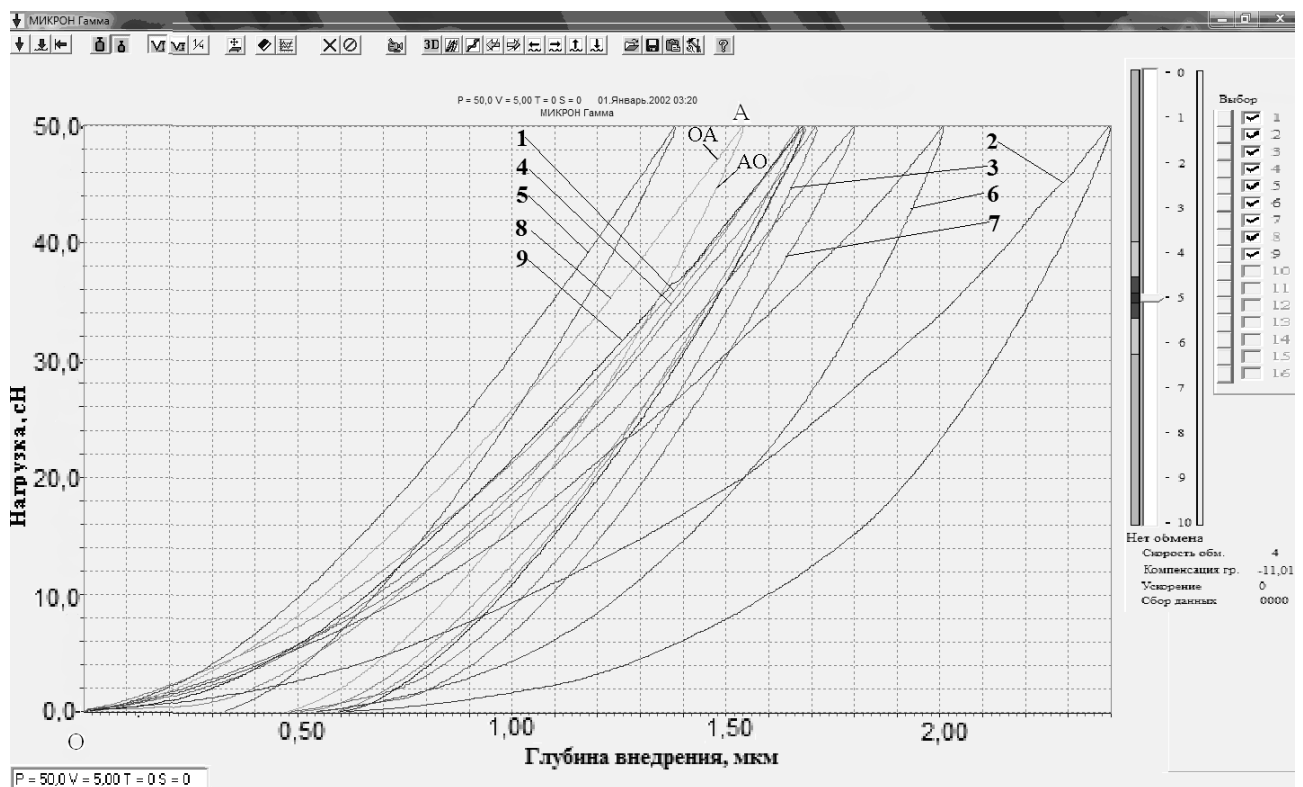


Рисунок 4.4 – Діаграми навантаження граніту індентором Берковича

Таблица расчетов

P = 50,0 V = 5,00

N°	h1,mkm	h2,mkm	H(Мартел)	Hн(Мейер)	H(Мейер)	E,GPa	Aоб	Aуп	s (пласт)	K пласт
1	1,667	0,589	7,491	7,347	16,115	105,8	28,33	21,56	0,239	0,522
2	2,395	0,609	3,560	3,558	5,471	72,0	39,95	24,34	0,391	0,710
3	1,711	0,480	7,553	6,975	14,232	104,9	30,89	21,44	0,306	0,585
4	1,683	0,501	8,295	7,201	15,068	106,6	32,33	22,66	0,299	0,598
5	1,379	0,324	12,507	10,731	26,604	146,2	26,80	21,44	0,200	0,531
6	1,678	0,594	8,143	7,251	14,796	109,1	31,42	21,15	0,327	0,600
7	1,797	0,545	6,982	6,317	13,140	93,8	33,13	21,80	0,342	0,584
8	1,536	0,472	10,116	8,647	19,369	123,2	29,97	21,11	0,296	0,575
9	2,005	0,540	5,713	5,075	8,476	91,6	37,64	22,86	0,393	0,699
D	0,276	0,083	2,381	1,911	5,697	19,537	3,971	1,001	0,060	0,061
M	1,761	0,517	7,818	7,011	14,808	105,911	32,273	22,040	0,310	0,600
%	15,7	16,0	30,5	27,3	38,5	18,4	12,3	4,5	19,3	10,2

Отступ % 10 dP % 10

Расчет Печать Форма Редактор

Рисунок 4.5 – Результати програмної обробки діаграм навантаження граніту індентором Берковича

Діаграма навантаження граніту складається з двох характерних ділянок: кривої навантаження (ОА) та кривої розвантаження (АО). На діаграмі відображається робота, витрачена індентором на подолання опору матеріалу $A_{об}$ – площа над гілкою навантаження, рис. 4.4. А також робота пружних сил виконана матеріалом на відновлення форми $A_{уп}$ після вдавлювання – площа під гілкою розвантаження, рис. 4.4. Визначення модуля пружності зразка по діаграмі навантаження базується на методі Олівера-Фара [109]. Результати представлені на рис. 4.5.

Модуль пружності для граніту визначався з результатів програмного аналізу (рис. 4.5) 9-ти діаграм навантаження (рис. 4.4). Кожна діаграма навантаження відповідає уколу індентора. Кінцеве значення модуля пружності для усього зразка визначалось як середньостатистичне з 9-ти результатів і становить – 105,9 ГПа. Дисперсія значень складає 18,4 %. Дослідження модуля пружності I роду для граніту після гідрокавітаційного навантаження з МІФКП представлений у додатку Ж. Даний зразок граніту має включення слюди,

польового шпату та кварцу. Незначне розсіювання даних обумовлене крупнозернистістю матеріалу зразка. Точки вдавлювання індентора розміщені, здебільшого на зернах кварцу, так як його відсоткова частка у зразку найбільша (65 %).

Для інших обраних видів зразків гірських порід модуль пружності визначався аналогічно.

З аналізу діаграми навантаження гнейсу та результатів її програмної обробки (додаток Ж) визначено, що модуль пружності – 145,6 ГПа. Дисперсія значень складає 39,4 %. Викликана полімінеральністю та дрібнозернистістю породи. Відстань між сусідніми точками вдавлювання індентора займає 100 мкм. Це достатня відстань для переходу від зернових включень кварцу до слюди та польового шпату. Останні мають різні фізико-механічні властивості і, як наслідок, модуль пружності.

З аналізу діаграми навантаження вапняку та результатів її програмної обробки (додаток Ж) визначено, що модуль пружності та дисперсія значень – 51,8 ГПа та 9,3 %, відповідно. Мале розсіювання значень обумовлено тим, що за хімічним складом вапняк, практично, мономінеральний. Частка кальцію – більше 90 %. Цим обумовлена однорідність модуля пружності у різних точках вдавлювання індентора.

З аналізу діаграми навантаження пісковика та результатів її програмної обробки (додаток Ж) визначено, що модуль пружності – 31,9 ГПа. Хвилястість кривої навантаження викликана структурою самого пісковика – дрібнозернистою польовошпаткварцевою. Включення польового шпату є більш слабким матеріалом за механічними характеристиками, ніж кварцовий пісок. Це підтверджено результатами обробки даних представленими у додатку М. Кварц є основною складовою породи частка якого займає 80 % [110]. При навантаженні польовий шпат стискається та ущільнюється. Зерна кварцу за таких умов починають «просідати». На діаграмі навантаження це відповідає ділянкам «западання». Значне розсіяння даних модуля пружності в 47,9 % обумовлене тим, що точки вдавлювання індентора виконані як на кварці

(відповідає значенням наближеним до максимуму, додаток Ж), так і на польовому шпаті (відповідає значенням наближеним до мінімуму, додаток Ж), які мають різні міцнісні характеристики.

Після обробки зразків гірських порід гідрокавітаційним навантаженням з МІФКП отримано діаграму та результати її програмної обробки для вапняку, додаток Ж. З аналізу даних визначено, що модуль пружності для вапняку зріс з 51,8 ГПа до 54,1 ГПа. Це пов'язано з тим, що при збільшенні навантаження скорочується пористість. Тобто, при ущільненні між елементарними частинками гірської породи поновлюються раніше втрачені адгезійні зв'язки та з'являються новоутворені. Також, при насиченні скельних гірських порід водою зростають їх пружні властивості [111], що підтверджено результатами експерименту. Зростання модулю пружності викликане формуванням ядра ущільнення, що супроводжується переходом у зону крихкого руйнування. Це підтверджено дослідженнями щільності зразку до та після гідрокавітаційного навантаження з МІФКП за допомогою пристрою УИСУ-01 [112]. Фото представлено у додатку К. Робота пристрою базується на тому, що, чим більша щільність матеріалу, тим більша швидкість проходження звукової хвилі крізь нього. Для даного зразку вапняку (табл. 4.1) до гідрокавітаційного навантаження з МІФКП швидкість звукової хвилі склала 4951 м/с, після – 5128 м/с, тобто на 3,5 % більше. Відомо, що породи, з мінімальною зоною пластичності (як правило, ті що мають упорядковану кристалічну структуру наприклад вапняки, граніти тощо) потребують меншої кількості енергії для руйнування, ніж ті, що мають високу пластичність (наприклад глини) [113]. Це пов'язано з наявністю кристалічної структури у порід, що руйнуються за пружно-крихким характером (наприклад скельні породи) та відсутністю її у порід, що руйнуються за пружно-пластичним характером (наприклад глинисті породи). У кристалічній структурі елементарні частинки мають радіус молекулярної дії. При прикладенні навантаження відбувається ущільнення, що супроводжується скороченням радіусу молекулярної дії та зростанням сил відштовхування. При досягненні критичного значення навантаження,

елементарні частинки відштовхуються одна від одної і виникає розрив зв'язку на мікрорівні та утворення тріщини на макрорівні. У пластичних породах цей механізм не діє через відсутність упорядкованої енергетичної взаємодії між елементами частинками. Частина енергії руйнування іде на утворення залишкової деформації.

Після обробки зразків пісковику гідрокавітаційним навантаженням з МІФКП повторно отримано діаграму навантаження та результати її програмної обробки, Додаток Ж.

Діаграми навантаження пісковику № 3, № 4 та № 5 мають хвилеподібний характер. Це пов'язано з тим, що після гідрокавітаційної обробки з МІФКП частина слабких фракцій зруйнувалась. У результаті цього виникли пустоти. При потраплянні індентора у зерна близькі до таких пустот, виникало відколювання часточки породи під навантаженням і втрата механічного контакту. Це проілюстровано обвалом діаграми. Середнє значення модулю пружності для пісковику зросло від 31,9 ГПа до 39,6 ГПа. Це відбулось за рахунок ущільнення пластичного мінералу польового шпату, частка якого складає 78 %.

На рис. 4.6 та 4.7 представлені залежності модуля пружності I роду гірських порід від значення магнітної індукції та від довжини дифузору кавітатора для обраних видів гірських порід.

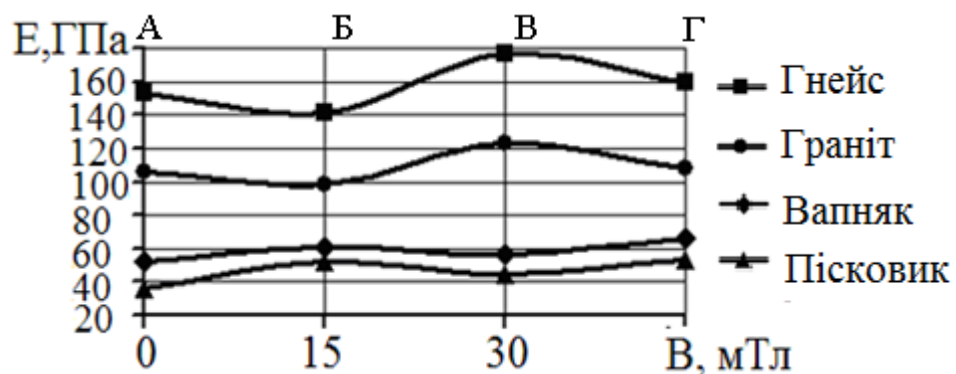


Рисунок 4.6 – Залежність модуля пружності I роду від значення магнітної індукції

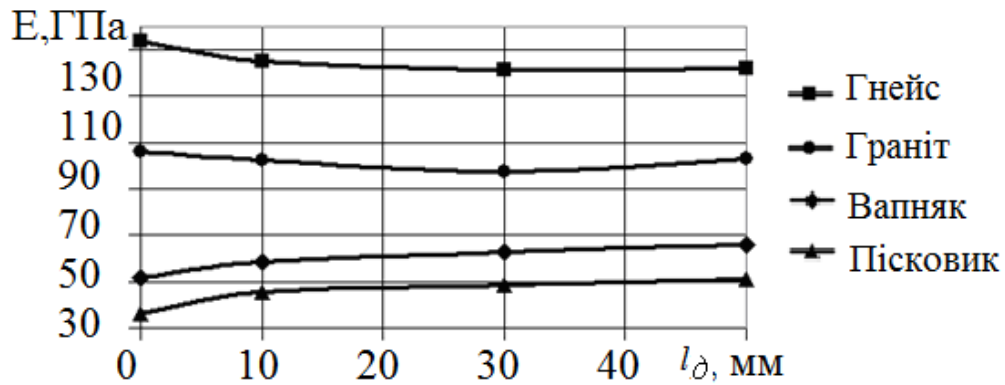


Рисунок 4.7 – Залежність модуля пружності I роду від довжини дифузору

У результаті аналізу залежностей, представлених на рис. 4.6 – 4.7 визначено, що модуль пружності для вапняку максимально зріс з 51,8 до 66,3 ГПа, для пісковіку – з 36,0 до 58,0 ГПа. Це пов'язано з тим, що за рахунок гідрокавітаційного навантаження з МІФКП зменшується пористість та виникає ущільнення. Також, при насиченні водою гірських порід (які схильні до водопоглинання) зростають їх пружні властивості [111]. По тим же причинам спостерігається зростання модуля пружності при збільшенні довжини дифузору кавітатора в межах (10...50) мм: для вапняку з 51,8 до 67,5 ГПа та для пісковіку з 36,0 до 51,4 ГПа.

Залежність $f=E(B)$ для пісковіку при магнітній індукції 30 мТл досягає значення – 58,0 ГПа. Це обумовлено завершенням процесу ущільнення під дією гідрокавітаційного навантаження з МІФКП. При цьому пісковик втрачає від 10 до 30 % пористості [113]. У результаті, починається пружно-крихке руйнування. Цим обумовлений спад модуля пружності (надалі E) до 53,3 ГПа.

Залежності $f=E(B)$ досліджуваних пружно-крихких порід на ділянці А-Б спадають: для гнейсу зі 153,6 до 141,2 ГПа та для граніту зі 105,9 до 98,4 ГПа. Спад E обумовлений утворенням дефектів та розущільненням під дією гідрокавітаційного навантаження з МІФКП, рис. 4.9. Цей процес описаний у підрозділі 4.5. Далі, на ділянці Б-В при магнітній індукції 30 мТл спостерігається зростання E : для гнейсу до 176,3 ГПа та для граніту до 123,2 ГПа. Це обумовлено явищем магнітопластичного ефекту [114]. Його суть полягає у впливі слабкого (до 1,6 Тл) електромагнітного поля на пластичність

парамагнітних та діамагнітних ГП, до яких відносяться граніт та гнейс. Крім того, спостерігається ініціювання руху крайових дислокацій. Пороговим значенням, при якому починається дія магнітопластичного ефекту, згідно [114] є 0,1 Тл. Проте у роботі [115] досліджено, що під дією зовнішнього електромагнітного поля з магнітною індукцією до 0,1 Тл відбувається приріст активності акустичної емісії. Це говорить про ініціювання руху і росту дислокацій та, як наслідок, тріщиноутворення. Також при дії слабкого електромагнітного поля з магнітною індукцією до 0,1 Тл, спостерігається зростання пластичності діамагнітних та парамагнітних гірських порід у (1,5...2) рази [116].

За результатами експериментальних досліджень даної дисертаційної роботи зроблено висновок, що порогове значення виникнення магнітопластичного ефекту є 0,015 Тл, рис. 4.6. При цьому, для граніту та гнейсу характерне пружно-пластичне деформування, що супроводжується ущільненням і, як наслідок, зростанням модуля пружності.

Після завершення процесу ущільнення, спостерігається пружно-крихке деформування (ділянка В-Г, рис. 4.6) зі спадом модуля пружності для граніту до 107,6 ГПа та для гнейсу до 159,8 ГПа. Це обумовлено рухом дислокацій під дією електромагнітного поля в межах магнітопластичного ефекту. Процес викликаний «переключенням» спінів дефектів, що приймають участь у деформації. Це призводить до вивільнення дислокацій від закріплюючих їх стопорів (парамагнітних центрів) [117]. Проте, якщо розглядати явище магнітопластичного ефекту для інших гірських порід, то відрив дислокації від закріплюючих її стопорів під дією слабких електромагнітних полів можливий лише у невірноважених структурах за рахунок конверсії спінів дислокації та дислокаційних стопорів [116]. Крім того, наявність домішок свинцю у гірських породах обумовлює негативну дію магнітопластичного ефекту, тобто призводить до ущільнення матеріалу. [118]. Встановлено [114], що час достатній для ефективного депінінгу (відриву) дислокацій від стопорів

становить 10^{-2} с. Крім того, напрям руху дислокацій не змінюється при зміні знаку електромагнітного поля.

При збільшенні зовнішнього тиску до 1,6 ГПа, магнітна сприйнятність гірських порід зменшується до 50 % від початкового значення [113]. Звідси зроблено висновок, що локально (у місцях схлопування кавітаційних бульбашок біля поверхні гірських порід) кавітаційне навантаження знижує магнітну сприйнятність. Згідно Т. Нагата та Н. Кіношита [113] зниження магнітної сприйнятливості є результатом повороту магнітного моменту елементарних об'ємів кристалічних ґраток (доменів) гірських порід та зміщення доменних меж за рахунок їх взаємодії з дефектами ґраток. Також при підвищенні локальних температур до 1773 К (1500 °С) [119] за рахунок дії кавітації знижується значення намагніченості насичення.

4.5 Виникнення локальних дефектів зразків гірських порід до та після ослаблення гідрокавітаційним навантаженням

Фото зразків граніту без обробки, після обробки кавітаційним та гідрокавітаційним навантаженням з МІФКП наведені на рис. 4.8, 4.9 та 4.10, відповідно.

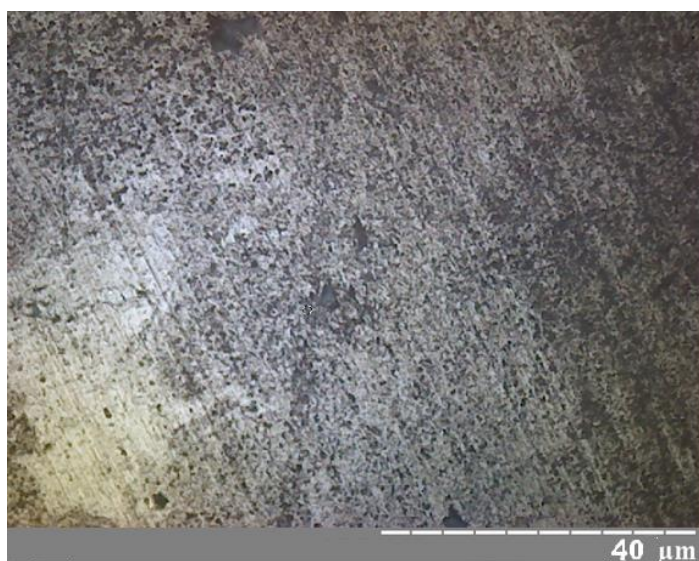


Рисунок 4.8 – Фото зразка граніту до обробки гідрокавітаційним навантаженням



Рисунок 4.9 – Фото зразка граніту після обробки гідрокавітаційним навантаженням



Рисунок 4.10 – Фото зразка граніту після обробки гідрокавітаційним навантаженням з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку

З фото представлених на рис. 4.8 та 4.9 видно, що після обробки граніту гідрокавітаційним навантаженням на зразку з'явилися локальні скупчення дефектів або зона перед руйнування (позиція 1). Кількість локальних дефектів – 4 одиниці на 1 мм^2 , середня довжина – 90 мкм. Ці дефекти викликані

схлопуванням кавітаційних бульбашок, що супроводжуються викидами енергії. Під час обробки гідрокавітаційним навантаженням з додаванням дії магнітної індукції (рис. 4.9) локальні дефекти утворюються у більшій кількості, ніж тільки при гідрокавітаційному навантаженні. Як показали проведені експерименти кількість локальних дефектів – 20 одиниць на 1 мм^2 , середня довжина – 100 мкм. Результат пояснюється фізичними процесами, описаними у роботах І. М. Федоткіна, Ю. І. Федоткіна, Я. І. Френкеля та інших [119 – 122]. На поверхні кавітаційних бульбашок при циркуляції рідини навколо каверни виникають електричні заряди. Вони групуються вздовж циркуляційних потоків, створюючи циркуляційний струм. При схлипуванні кавітаційної бульбашки (зі зменшенням її розмірів) відбувається концентрація напруженості електричного поля. Під дією цього електричного поля відбувається активація та іонізація газів всередині бульбашки, що завершується електричним розрядом. У результаті, виникає електричний пробій, який супроводжується появою трьохвалентного кисню. Так збільшується кількість ядер кавітації. Відповідно, інтенсифікується кавітаційний процес. Це також підтверджено дослідженнями В. І. Классена, Р. Ш. Шафеева, Г. Н. Хажинської, Б. М. Корюкіна та інших [123 – 124]. Вони експериментально довели за методом Вінклера та пірогаловим методом, що концентрація кисню у воді при омагніченні зростає на (6...20) % від початкового значення.

Крім того, під дією магнітної індукції відбувається досягнення прецесування молекул води та розчинених у ній домішок за Ларморовим колом з частотою ($10^8 \dots 10^9$ Гц). Таке субрезонансне навантаження до власної частоти коливань кристалічної структури гірських порід сприяє утворенню штучної тріщинуватості та ослабленню поверхневого шару.

Ще однією причиною інтенсивного утворення локальних дефектів та тріщин при гідрокавітаційному навантаженні з МІФКП є дрібномасштабна турбулізація води біля поверхні домішок [119, 123, 125]. При створенні у рідині магнітного поля, на міжфазних границях (наприклад, рідина – газ, рідина –

тверде тіло) виникають індукційні струми зі щільністю j_0 у об'ємі рідини та $j_{мф}$ на між фазних границях, А/м² [119, 123, 125]:

$$j_0 = \sigma_0 \cdot (\vec{V}_0 \cdot \vec{B}_0); \quad (4.2)$$

$$j_{мф} = \sigma_{мф} \cdot (\vec{V}_{мф} \cdot \vec{B}_{мф}), \quad (4.3)$$

де σ_0 та $\sigma_{мф}$ – електропровідність у об'ємі рідини та на між фазних границях, відповідно, 1/Ом;

\vec{V}_0 та $\vec{V}_{мф}$ – швидкість руху рідини у об'ємі рідини та на між фазних границях, відповідно, м/с;

\vec{B}_0 та $\vec{B}_{мф}$ – магнітна індукція у об'ємі рідини та на між фазних границях, відповідно, Тл.

У результаті, по всьому об'єму рідини виникає макро та мікромасштабна турбулізація. Вона характеризується підвищеною інтенсивністю при виконанні умов виникнення кавітації. Дослідження [123, 125] показали, що за рахунок дії магнітного поля, турбулізація кавітації з деаерацією рідини прискорюється у 2-3 рази. Процес супроводжується високоенергетичними реакціями при схлопуванні (колапсі) кавітаційних бульбашок: енергія кавітаційного потоку близько $(10^4 \dots 10^5)$ кВт/м³, швидкість бульбашок $(550 \dots 650)$ м/с, тиск $(800 \dots 1000)$ МПа [119].

Крім того, при гідрокавітаційному навантаженні з МІФКП передзародкові місцеві скупчення тріщин граніту (рис. 4.10), в більшості, мають однонаправлений характер. Це пояснюється орієнтацією руху кавітаційних каверн за Ларморовим колом. Згідно електрокінетичного ефекту Рейса [106], під дією магнітного поля відбувається намагнічування зважених твердих частинок рідини, бульбашок газу (кавітаційні зародки - нуклеони радіусом 10^{-9} м [119]), колоїдних частинок або краплин іншої рідини, що є ядрами кавітації. Магнітні моменти вище перелічених об'єктів (надалі

домішок), згідно ефекту Річардсона - Де Гааза – Ейнштейна [106], орієнтуються вздовж вектора магнітної індукції. Це призводить до упорядкованої зміни їх механічних моментів. При цьому, повний механічний момент залишається незмінним. Внаслідок цього, тіло отримує обертальний момент руху і починає прецесувати за ларморовим колом. Також це підтверджується теоремою Лармора (підрозділ 4.2). З теорії ефекту Векслера – Макмілана [106], якщо вектор швидкості руху частинки \vec{v}_q , що має заряд q та масу m_q , утворює прямий кут з лініями вектору магнітної індукції \vec{B} , то траєкторією частинки є коло радіусом R , м. Цей параметр є радіусом Ларморової прецесії.

$$R = \frac{m_q \cdot v_q}{q \cdot B}, \quad (4.4)$$

З аналізу (4.4) видно, що значення магнітної індукції B має обернено-пропорційну залежність до радіусу прецесування R . У промисловому різці кавітаційному та у експериментальній установці магніти та обмотка розміщені таким чином, що B зростає в межах від 10 до 50 мТл у напрямку виходу кавітатора з метою фокусування кавітаційного потоку.

При цьому частинка обертається по визначеному радіусу R з періодом, що не залежить від швидкості руху частинки \vec{v}_q , с [106]:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \frac{m_q}{q \cdot B}. \quad (4.5)$$

Побудовано топографію поверхні гнейсу до гідрокавітаційного навантаження (Рис. 4.11 а) та після (Рис. 4.11 б) для порівняння геометричних характеристик природної та штучної тріщинуватості. Топографія виконана засобами мікроскопічного дослідження безконтактного інтерференційного 3D профілографу «Мікрон Альфа». З аналізу результатів досліджень профілів поверхонь рис. 4.11 а та 4.11 б визначено, що середнє значення глибини дефектів поверхонь після обробки гідрокавітаційним навантаженням з

магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку ($B=15$ мТл) зростає з 0,6 мкм до 4 мкм.

Також побудовано трьохвимірні моделі поверхонь досліджуваних ділянок гнейсу (50x70 мкм). У результаті їх комп'ютерного аналізу, визначено, що після обробки гідрокавітаційним навантаженням з МІФКП трьохвимірна площа зростає з 3681 мкм² до 3868 мкм², тобто на 5 %. Це викликано появою дефектностей, що супроводжуються утворенням нових поверхонь. Окрім того, про утворення дефектів свідчить збільшення шорсткості: середнє арифметичне відхилення профілю R_a – з 0,09 мкм до 0,19; висота нерівностей профілю по десяти точкам R_z з 0,32 до 0,75 мкм.

На 3D моделі поверхні світло-сірим кольором представлено дефектності (білим колір відповідає найбільшій глибині 5 мкм). Дефектності є впадинами у вигляді кратерів, що виникли у результаті схлопування кавітаційних бульбашок

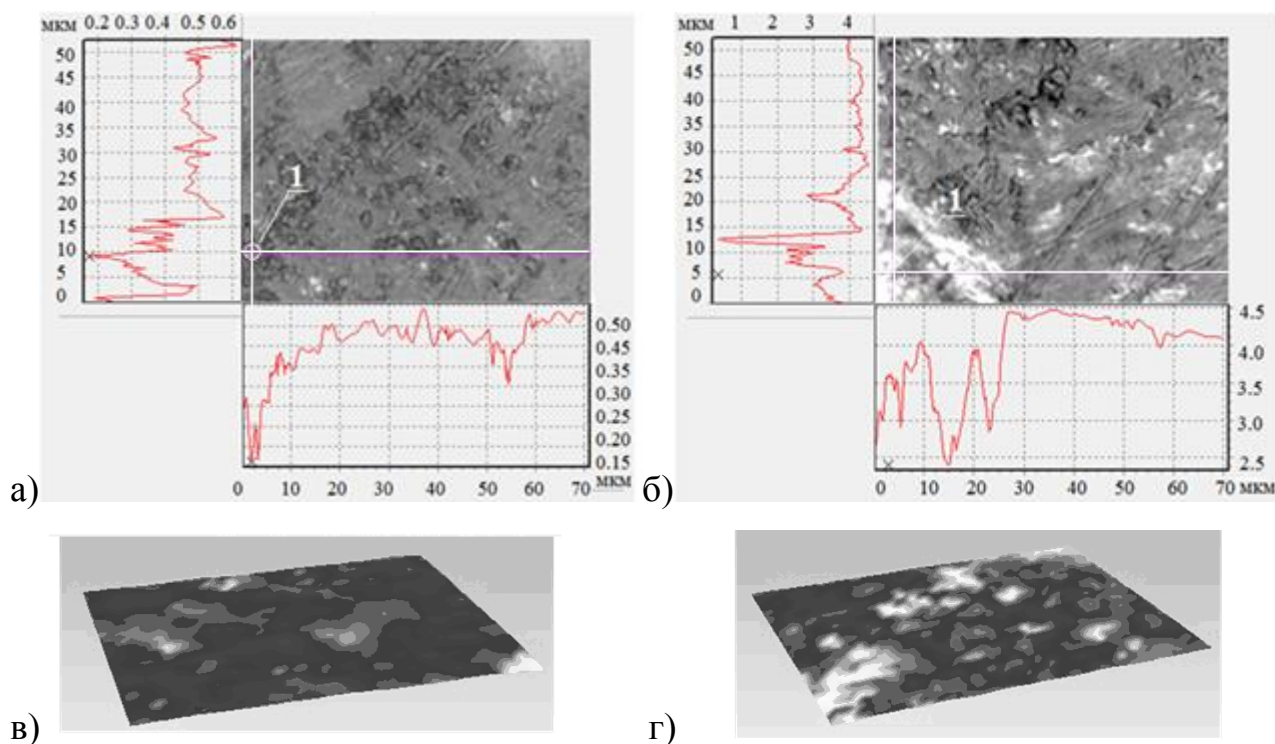


Рисунок 4.11 – Топографія поверхні гнейсу а – до гідрокавітаційного навантаження; б – після гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням при магнітній індукції 15 мТл; в – 3D до магнітно-гідрокавітаційного навантаження; г– 3D після гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням при магнітній індукції 15 мТл

біля поверхні гірської породи. Їх форма обумовлена кулеподібною формою кавітаційної бульбашки. Площа поверхонь дефектів від загальної площі поверхні досліджуваної ділянки до гідрокавітаційного навантаження з МІФКП займає близько 15 %, після навантаження при магнітній індукції 15 мТл – близько 40 %. На рис. 4 в вони мають природний характер походження. На рис. 4 г мають місце природна та штучно внесена тріщинуватість, що виникли у результаті схлопування кавітаційних бульбашок біля поверхні матеріалу. Площа поверхні дефектів від загальної площі у першому випадку займає біля 15 %, у другому – близько 40 %.

4.6 Зміна питомої поверхневої енергії під дією гідрокавітаційного навантаження

Як відомо, зміна питомої поверхневої енергії впливає на руйнування твердого тіла. У відомих дослідженнях ППЕ розглядається як «константа матеріалу». Вчені надають їй різну інтерпретацію. Згідно експериментальних даних [27], ППЕ залежить від оточуючого матеріал середовища і впливає на швидкість поширення тріщини. Ці експериментальні дані спростовують припущення, що ППЕ є «константою матеріалу». Для експериментального дослідження зміни ППЕ обрано гідрокавітаційне навантаження з МІФКП, принцип дії якого описаний у підрозділі 1.2.

У ході експериментальних та аналітичних досліджень визначений вплив зміни магнітної індукції та довжини дифузору кавітатора на питому поверхневу енергію гірських порід. Для експериментального визначення питомої поверхневої енергії обраних зразків гірських порід встановлено наступні параметри (згідно (1.22)):

– модуль пружності за допомогою наноіндентометра «Мікрон Гамма» (рис. 4.6 - 4.7);

– радіус дії молекулярних зв'язків та відстань між сусідніми площинами розщеплення, отриманими на рентгеноструктурному дифрактометрі «Regaku Ultima IV» (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Молекулярні параметри гірських порід, що визначають питому поверхневу енергію.

Вид гірської породи	Радіус дії молекулярних зв'язків, Å	Відстань між площинами розщеплення	Вид гірської породи	Радіус дії молекулярних зв'язків, Å	Відстань між площинами розщеплення, Å
Пісковик	12	9	Гнейс	7	12
Вапняк	24	18	Граніт	14	24

На основі даних представлених на рис. 4.6 – 4.7 та у табл. 4.3, побудовано експериментальні та теоретичні залежності питомої поверхневої енергії від магнітної індукції та довжини дифузору кавітатора, рис. 4.12, 4.13. Встановлені значення ППЕ співпали з експериментальними дослідженнями [126].

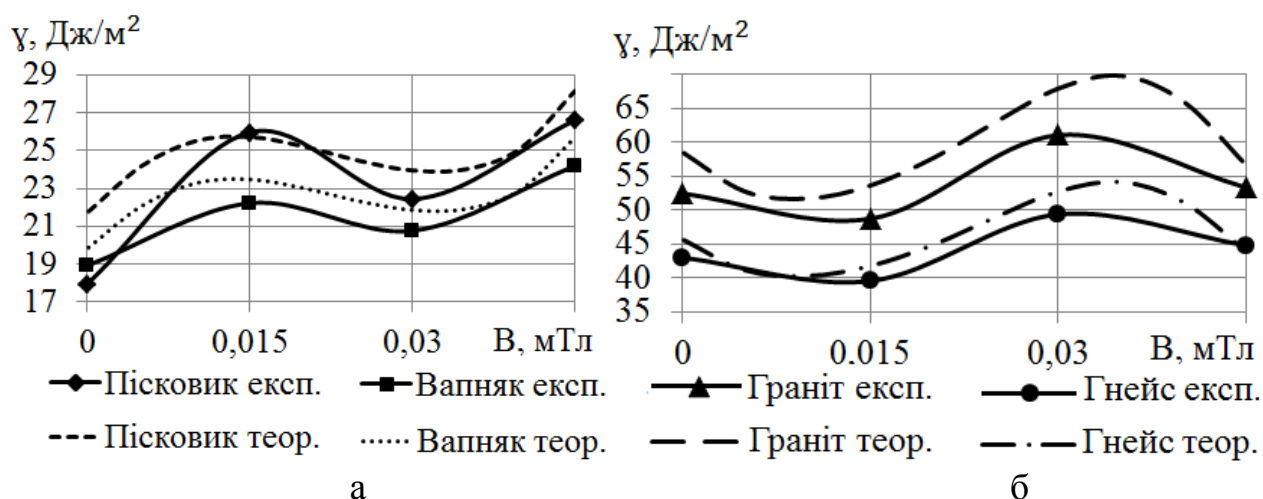


Рисунок 4.12 – Залежності питомої поверхневої енергії від магнітної індукції пісковика та вапняку (а), граніту та гнейсу (б)

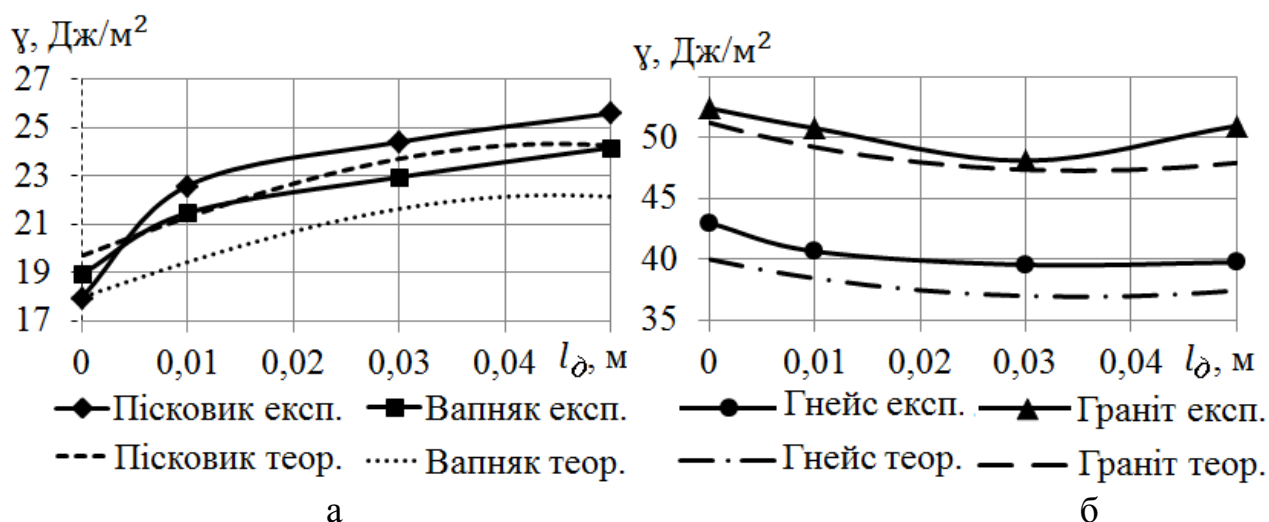


Рисунок 4.13 – Залежності питомої поверхневої енергії від довжини дифузору кавітатора пісковика та вапняку (а), граніту та гнейсу (б)

Теоретичні залежності рисунків (4.12) – (4.13) побудовані за математичною моделлю (3.21), відкоригованою на основі регресійного аналізу згідно експериментальних даних до вигляду (4.6), Дж/м²:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \hbar^4 \cdot \omega^4 \cdot l_{kp} \cdot N_a^2}{Y_0 \cdot d^4 \cdot m^2 \cdot H^2 \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta \cdot V^3 \cdot \zeta \cdot K_T}, \quad (4.6)$$

де K_T – технологічний коефіцієнт.

Математична модель (4.6) відрізняється від раніше створених тим, що її використання для різних гірських порід корегується технологічним коефіцієнтом K_T , який ураховує магнітну індукцію та довжину дифузору кавітатора робочого органу: для пружно-крихких гірських порід (4.7) та для пружно-пластичних гірських порід (4.8).

$$K_T = \frac{(-0,1078 \cdot l_\delta^2 - 0,0076 \cdot l_\delta + 0,0016)}{(50,1728 \cdot B^3 - 3,2622 \cdot B^2 + 0,0463 \cdot B + 0,0014)^{-1}}; \quad (4.7)$$

$$K_T = \frac{\left(0,6023 \cdot l_{\partial}^2 - 0,0542 \cdot l_{\partial} + 0,0064\right)}{(-119,0617 \cdot B^3 + 8,1667 \cdot B^2 - 0,1558 \cdot B + 0,0058)^{-1}}. \quad (4.8)$$

Технологічні коефіцієнти (4.7) та (4.8) отримано на основі регресійного аналізу експериментальних залежностей ППЕ від магнітної індукції та довжини дифузору робочого інструменту. Межі застосування математичної моделі (4.6):

– магнітна індукція у дифузорі кавітатора різця кавітаційного від 15 до 45 мТл;

– довжина дифузору від 0,01 м до 0,05 м.

Для інших діапазонів вказаних параметрів потрібно проводити додаткові дослідження на перевірку похибки аналітичних та експериментальні результати значень питомої поверхневої енергії.

Залежності ППЕ від магнітної індукції та довжини дифузору кавітатора за характером подібні до залежностей, модуля пружності від тих же параметрів. Це пов'язано з тим, що одним із ключових параметрів які визначають ППЕ є пружні властивості гірських порід.

4.7 Зміна питомої енергоємності руйнування при зменшенні питомої поверхневої енергії при гідрокавітаційному навантаженні

Експериментально визначено залежності зміни ППЕ та енергоємності руйнування від зміни магнітної індукції, що діє на зразки гірських порід гнейсу та граніту – рис. 4.14, пісковика та вапняку – рис. 4.15.

Залежності, представлені на рис. 4.14 мають спадно-зростаючий поліноміальний характер. На першій ділянці (0...15) мТл питома поверхнева енергія спадає: для граніту з 52,4 до 48,7 Дж/м²; для гнейсу з 43,0 до 39,5 Дж/м². Спад γ обумовлений утворенням дефектів та розміщенням під дією гідрокавітаційного навантаження з МІФКП. На ділянці (15...30) мТл спостерігається зростання γ : для гнейсу до 49,6 Дж/м²; для граніту до

61,0 Дж/м². Це обумовлено явищем магнітопластичного ефекту [127]. Під дією слабого електромагнітного поля зростає пластичність граніту та гнейсу. У результаті чого спостерігається ущільнення, та, як наслідок, зростання γ . Після

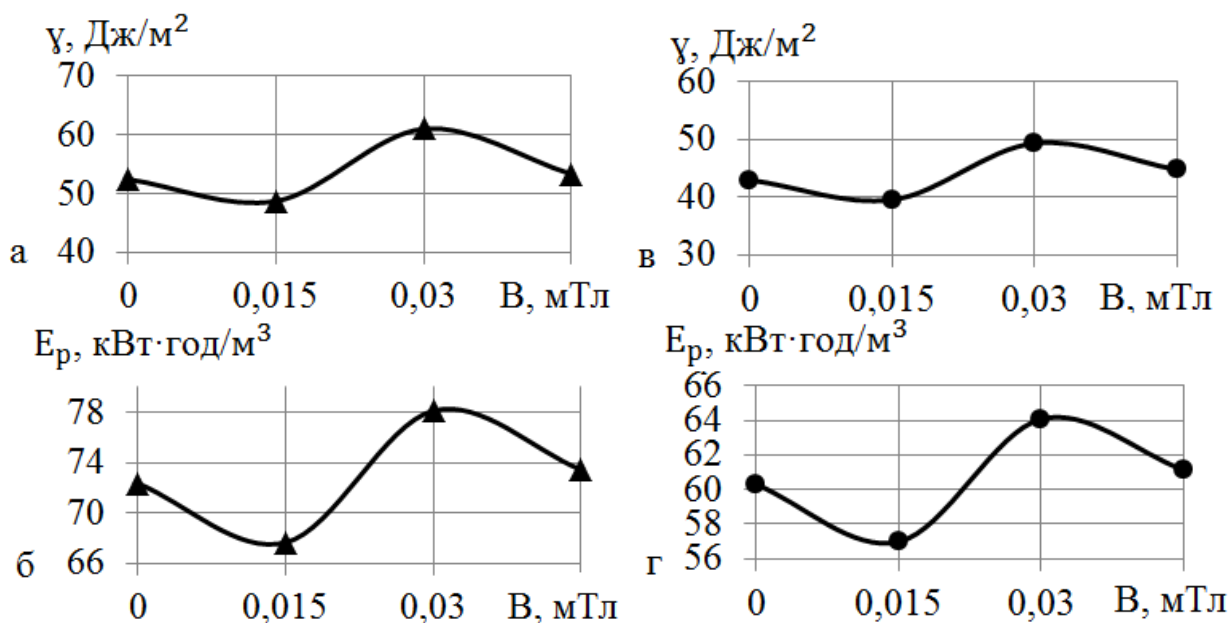


Рисунок 4.14 – Залежності питомої поверхневої енергії (а, в) та енергоемності руйнування (б, г) від магнітної індукції а, б – граніту; в, г – гнейсу

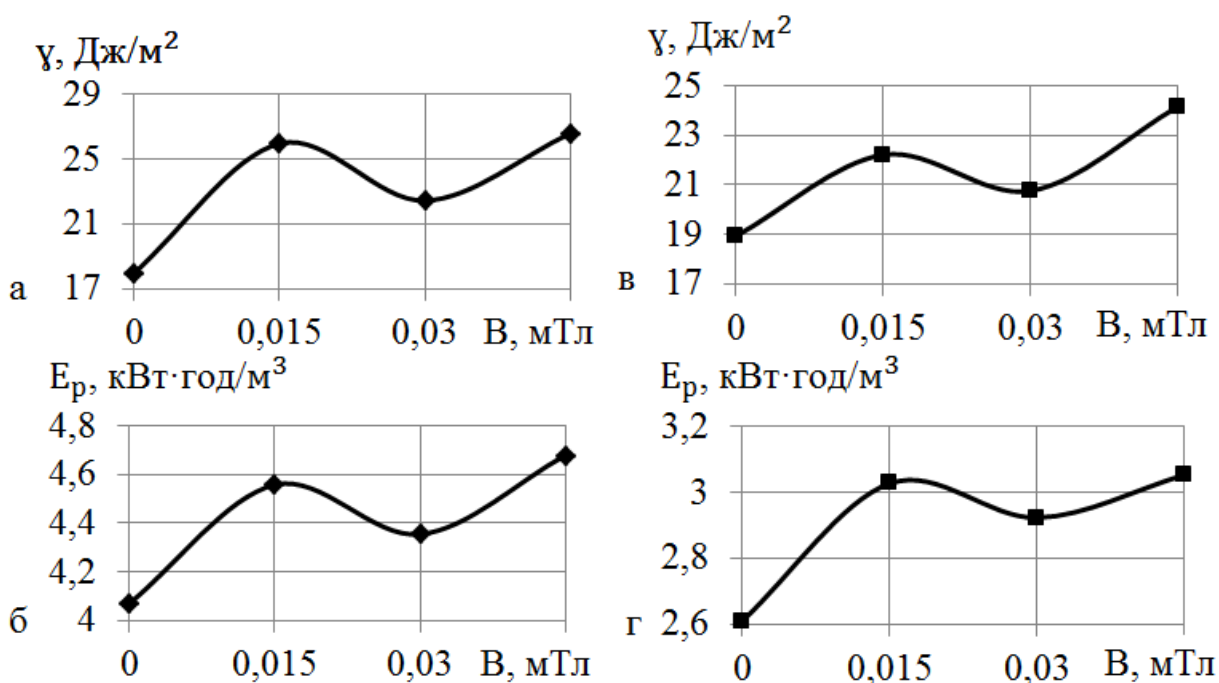


Рисунок 4.15 – Залежності питомої поверхневої енергії (а, в) та енергоемності руйнування (б, г) від магнітної індукції для: а, б – пісковика; в, г – вапняку;

завершення процесу ущільнення, при магнітній індукції 30 мТл, починається розміцнення, що характеризується спадом питомої поверхневої енергії: для граніту до 53,3 Дж/м², для гнейсу до 44,7 Дж/м².

Для пружно-пластичних, обраних різновидів, гірських порід вапняку та пісковика залежності питомої поверхневої енергії та енергоємності руйнування, представлені на рис. 4.15, мають зростаюче-спадний характер. Тобто, обернений до залежностей пружно-крихких гірських порід гнейсу та граніту. Це обумовлено тим, що у пружно-пластичних гірських породах має місце зворотній магнітопластичний ефект. Тобто, при прикладенні зовнішнього магнітного поля зростають їх пружні властивості. Процес супроводжується зростанням питомої поверхневої енергії при магнітній індукції (0...45) мТл: для вапняку з 18,9 Дж/м² до 24,2 Дж/м²; для пісковика з 18,0 Дж/м² до 26,6 Дж/м². Це пов'язано з тим, що під дією гідрокавітаційного навантаження з МІФКП відбувається зменшення пористості на (10...30) %, ущільнення та насичення водою, що сприяє зростанню пружних властивостей матеріалів. Звідси, зроблено висновок, що руйнування з додатковим гідрокавітаційним навантаженням з МІФКП доцільно використовувати для пружно-крихких гірських порід.

Базовою моделлю для встановлення залежності між енергоємністю руйнування та ППЕ обрано (1.12). Вона містить теоретичну межу міцності σ_T , що за фізичною суттю є мірою кількості енергії (Дж=кВт·год/м³), яка витрачається на утворення одиниці об'єму зруйнованого матеріалу (м³) [128]. На основі цього σ_T^2 розкладено на дві складові: власне σ_T та енергоємність руйнування E_p . У результаті (1.12) приймає вигляд:

$$l_{kp} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot E_p}, \quad (4.9)$$

З (4.9) виражено енергоємність руйнування, кВт·год/м³:

$$E_p = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}}, \quad (4.10)$$

Враховано наявність тріщин в породі через параметр l_{kp} . В механіці руйнування довжина тріщини вважається критичною, якщо при її розвитку кількість виділеної пружної енергії більше кількості енергетичних витрат пластичної деформації [129].

У результаті аналізу експериментальних залежностей, представлених на рис. 4.14 – 4.15 та на основі методу регресійного аналізу, проведено коригування математичної моделі енергоємності руйнування для кожного з досліджуваних різновидів гірських порід: пісковика $E_p(\Pi)$, вапняку $E_p(B)$, гнейсу $E_p(\Gamma n)$ та граніту $E_p(\Gamma p)$, кВт·год/м³.

$$E_p(\Pi) = \frac{2 \cdot (2,2608 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(\gamma) - 1,0391 \cdot 10^{-9}) \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}}, \quad (4.10)$$

$$E_p(B) = \frac{2 \cdot (2,2608 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(\gamma) - 20,8393 \cdot 10^{-9}) \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}}, \quad (4.11)$$

$$E_p(\Gamma n) = \frac{2 \cdot (33,2608 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(\gamma) - 1,0391 \cdot 10^{-9}) \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}}, \quad (4.12)$$

$$E_p(\Gamma p) = \frac{2 \cdot (38,2608 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(\gamma) - 1,0391 \cdot 10^{-9}) \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}}, \quad (4.13)$$

Розроблені математичні моделі енергоємності руйнування гірських порід (4.10) – (4.13) відрізняється від відомих тим, що враховує питому поверхневу енергію та довжину критичної тріщини.

Математичні моделі (4.10) – (4.11) доцільно використовувати для гірських порід зі значенням ППЕ в межах (15...30) Дж/м²; (4.12) – (4.13) – для порід зі значенням ППЕ в межах (30...70) Дж/м².

На основі (4.10) – (4.13) побудовано залежності енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії, рис. 4.16.

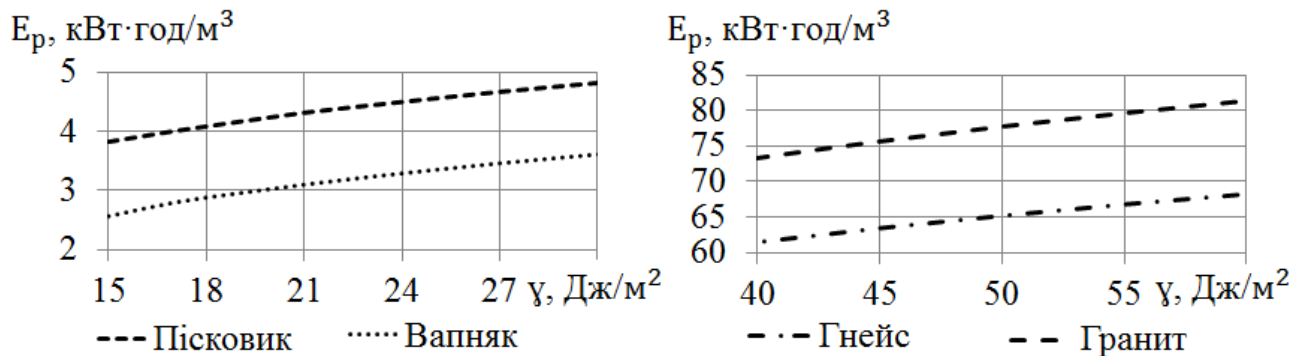


Рисунок 4.16 – Залежності енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії

Залежності мають зростаючий логарифмічний характер. Це співпадає з законом Ріттингера (1867 р.), згідно якому питома поверхнева енергія пропорційна роботі, утворення нових поверхонь матеріалу. Відповідно, зниження питомої поверхневої енергії, викликає зменшення енергоємності руйнування.

4.8 Рівняння регресії питомої поверхневої енергії

У результаті експериментальних досліджень питомої поверхневої енергії від незалежних змінних параметрів: магнітної індукції та довжини дифузору кавітатора різця кавітаційного сформовано таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Залежність питомої поверхневої енергії від незалежних змінних параметрів

№ дослідів	x_1 – магнітна індукція у дифузори В, Тл	x_2 – довжина дифузору l_d , мм	y – питома поверхнева енергія, Дж/м²
1	2	3	4
1	0,015	10	50,8

Закінчення табл. 4.4

1	2	3	4
2	0,015	30	48,7
3	0,015	50	51,0
4	0,030	10	64,1
5	0,030	30	61,0
6	0,030	50	63,5
7	0,045	10	56,4
8	0,045	30	53,3
9	0,045	50	55,9

На основі таблиць 2.3 та 4.4 побудовано матриці умов і результатів досліджень питомої поверхневої енергії від B та l_{∂} , додаток Л. У результаті ряду математичних перетворень цих матриць за методикою [45] отримано значення коефіцієнтів рівняння регресії. Звідси, (2.1) приймає вигляд, Дж/м²:

$$\gamma = y_n = 21,03 + 2892 \cdot B - 38,18 \cdot l_{\partial} - 57,5 \cdot B \cdot l_{\partial} - 45110 \cdot B^2 + 65,25 \cdot l_{\partial}^2. \quad (4.14)$$

Результати аналітичних досліджень ППЕ від B та l_{∂} на основі рівняння регресії представлені у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати аналітичних досліджень питомої поверхневої енергії на основі рівняння регресії

y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9
51,0	48,4	51,1	63,9	61,1	63,6	56,4	53,5	55,8

Середньоквадратичне відхилення виражене дисперсією рівняння регресії згідно (2.11), Дж/м²:

$$s_y^2 = \frac{1}{9-1} \cdot \sum_1^9 \left(\begin{aligned} &(51,0 - 50,8)^2 + (48,4 - 48,7)^2 + (51,4 - 51,0)^2 + \\ &+ (63,9 - 64,1)^2 + (61,1 - 61,0)^2 + (63,6 - 63,5)^2 + \\ &+ (56,4 - 56,4)^2 + (53,5 - 53,3)^2 + (55,8 - 55,9)^2 \end{aligned} \right) = 0,03. \quad (4.15)$$

Розрахункова середня змінна стану виражена через середнє значення дисперсії, згідно (2.14), Дж/м²:

$$y_u = \frac{1}{9} \cdot \sum_1^9 \left(\begin{aligned} &51,0 + 48,4 + 51,1 + 63,9 + 61,1 + 63,6 + \\ &+ 56,4 + 53,5 + 55,8 \end{aligned} \right) = 56,1. \quad (4.16)$$

Похибка досліджень, в.о.:

$$\Delta y = \frac{1}{9} \cdot \sum_1^9 \left(\begin{aligned} &\frac{(51,0 - 50,8)}{51,0} + \frac{(48,4 - 48,7)}{48,4} + \frac{(51,1 - 51,0)}{51,1} + \\ &+ \frac{(63,9 - 64,1)}{63,9} + \frac{(61,1 - 61,0)}{61,1} + \frac{(63,6 - 63,5)}{63,6} + \\ &+ \frac{(56,4 - 56,4)}{56,4} + \frac{(53,5 - 53,3)}{53,5} + \frac{(55,8 - 55,9)}{55,8} \end{aligned} \right) \cdot 100 = 0,028 \quad (4.17)$$

Параметр Δy характеризує похибку аналітичних досліджень питомої поверхневої енергії на основі рівнянь регресії.

Висновки

1. Визначено спадно-зростаючі поліноміальні залежності зміни енергоємності руйнування гірських порід при їх розміщенні гідрокавітаційним навантаженням з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку та розроблено математичну модель, що дозволяє врахувати питому поверхневу енергію та довжину критичної тріщини.

2. Встановлено, що для гнейсу та граніту енергоємність руйнування спадає з 61 кВт·год/м³ до 57 кВт·год/м³ та з 73 кВт·год/м³ до 68 кВт·год/м³ при зниженні питомої поверхневої енергії, відповідно, зі 43,0 Дж/м² до 39,5 Дж/м² та з 52,4 Дж/м² до 48,7 Дж/м².

3. Для граніту та гнейсу модуль пружності I роду знижено зі 105.9 до 98.39 ГПа та зі 153.6 до 141.2 ГПа, відповідно, при гідрокавітаційному навантаженні з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку при магнітній індукції 15 мТл.

4. Для пісковика та вапняку при зростанні магнітної індукції від 0 до 45 мТл спостерігалось зростання модуля пружності від 36,0 до 58,0 та від 51,8 до 66,3 ГПа, відповідно.

5. Результати досліджень по механізму створення зони передруйнування та ослаблення масиву гірських порід гідрокавітаційним навантаженням з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку представлені у фахових виданнях [131–132]. Також дослідження зниження енергоємності руйнування гірських порід за рахунок використання енергії прецесуючого кавітаційного потоку представлені на міжнародній науково-практичній конференції [133] та комбінований енергозберігаючий обертово-гідрокавітаційний спосіб руйнування [134]. Питома поверхнева енергія, як один з ключових параметрів руйнування гірських порід [135].

РОЗДІЛ 5

ПРОМИСЛОВА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБЕРТОВО-ГІДРОКАВІТАЦІЙНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД З МАГНІТНО-ІНДУКЦІЙНИМ ФОКУСУВАННЯМ КАВІТАЦІЙНОГО ПОТОКУ

5.1 Умови промислової реалізації обертово-гідрокавітаційного руйнування гірських порід

Впровадження обертово-гідрокавітаційного руйнування гірських порід з індукційним фокусуванням кавітаційного потоку (далі обертово-гідрокавітаційного руйнування з МІФКП) проводилось на кварцитовому кар'єрі Товкачівського гірничо-збагачувального комбінату (ГЗК), додаток М. Фізико-механічні характеристики кварцитів представлені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Фізико-механічні характеристики кварцитів Товкачівського ГЗК

Параметр	Значення
Міцність на стиснення, МПа	250
Питома вага, кг/м ³	2600
Твердість за шкалою проф. М. М. Протодьяконова, в. о.	10...12
Модуль пружності, ГПа	165
Потужність шару кварциту, м	23

Апробацію нового обертово-гідрокавітаційного руйнування з МІФКП гірських порід проведено на базі бурової установки Diames 232 (Виробництва фірми Atlas Copco, Швеція). Характеристики бурової установки представлені у табл. 5.2

Таблиця 5.2 – Характеристики бурової установки Diames 232

Параметр	Значення
Діаметр свердловини, мм	110
Максимальна глибина буріння, м	450
Кут нахилу свердловини, градус	0...90
Потужність приводу обертача, кВт	15
Витрати промивної рідини, м ³ /с	0,005
Частота обертання інструменту, об/хв.	550-2200

При бурінні свердловин для промивки установку Diames 232 [136] оснащено буровим насосом НБ5-320/100 [137] з продуктивністю – 0,005 м³/с. Для буріння використано бурові штанги Steel 60 [136].

Руйнування кварцитів проводилось на горизонті 40 м. У результаті, пробурено 20 свердловин глибиною по 15 м, розташованими в два ряди (у кожному по 10 свердловин). Відстань між рядами 7 м.

Орієнтовний час проведення усіх дослідів по визначенню енергоємності обертково-гідрокавітаційного руйнування з МІФКП кварцитів, год [138]:

$$t_{\partial} = n \sum_{i=1}^m t_i p_i = 1 \cdot \sum_{i=1}^5 3,75 \cdot 4 = 60, \quad (5.1)$$

де n – кількість серій випробувань, шт.;

m – кількість досліджуваних точок, шт.;

t_i – час проведення дослідів, год;

p_i – повторюваність кожного дослідів, шт.

Кількість серій випробувань – 1, так як досліджується в промислових умовах залежність енергоємності руйнування від одного параметру – магнітної індукції. Повторюваність кожного дослідів визначена у другому розділі даної

дисертації – 4 рази, з яких 1 основний і 3 повторних. Кількість досліджуваних точок енергоємності руйнування кварцитів – 5:

- при традиційному обертовому руйнуванні – 1-ша точка;
- при обертово-магнітногідрокавітаційному руйнуванні – 4 точки для магнітної індукції – 0 мТл, 15 мТл, 30 мТл, 45 мТл.

Час проведення одного дослідів – це середній час буріння однієї свердловини глибиною 15 м та діаметром 110 мм – 3 год 45 хв.

Трудоємність проведення дослідів Q , людино-годин:

$$Q = n \sum_{i=1}^m t_i p_i z_i = 1 \cdot \sum_{i=1}^5 3,75 \cdot 4 \cdot 2 = 120, \quad (5.2)$$

де z_i – кількість робітників, людей.

Отримані значення t_d та Q збільшено вдвічі [138], оскільки при їх визначенні не ураховані витрати на допоміжні та організаційні роботи такі як: підготовка бурового розчину; монтаж обладнання; перевірка справності роботи, транспортування та установка бурової установки на місці буріння тощо. Отже, $t_d=120$ год та $Q=240$ людино-годин.

У якості промивної рідини використано багатofазний полідисперсний буровий розчин за ГОСТ 33213-2014 [139] зі щільністю 1130 кг/м³, з вмістом до 5 % бентоніту ГОСТ 25795-83 [140] та поверхнево-активних речовин (сульфонол – 0,3 %; допоміжна речовина ОП-10 – 0,6 % за ГОСТ 8433-81 [141]; сульфонатрієві солі – 1,5%). Поверхнево-активні речовини, що містяться у буровому розчині полегшують процес розриву середовища на межі розділення двох фаз при кавітації [142]. Крім того, кавітаційні процеси у буровому розчині супроводжуються диспергуванням твердих частинок з утворенням дрібнодисперсної структури. Це сприяє зниженню рівня ризику заклинювання роботи інструменту.

Кавітація у буровому розчині та у воді має відмінності. Це пов'язано з різними значеннями їх щільності. Остання впливає на величину локального тиску, а відповідно, і на число кавітації.

Вплив стисливості бурового розчину на утворення і перебіг процесу кавітації при обертово-магнітногідрокавітаційному руйнуванні гірських порід не враховувався. Це обумовлено тим, що локальні перепади тисків при русі рідини мають менший вплив, ніж об'ємний модуль її пружності [107]. Тому, буровий розчин вважається не стисливою рідиною.

В'язкість рідини, у якій утворюється кавітація, визначає дисипацію механічної енергії у процесі зростання та схлопування кавітаційних бульбашок. Збільшення в'язкості рідини призводить до зменшення максимального розміру бульбашки, а також швидкості її зростання та схлопування. Відомо [107], що значення в'язкості нормальних рідин можуть відрізнятися в тисячі разів. Проте, в'язкість води мала (1 мПа·с [143]), тому її впливом на кавітацію можна знехтувати. В'язкість бурового розчину, використаного при проведенні промислового експерименту (1.5 мПа·с), наближена до в'язкості води, тому її значення не враховувалось. Але у разі використання обважених бурових розчинів при обертово-гідрокавітаційному руйнуванні з МІФКП ($\rho \approx 2000 \text{ кг/м}^3$) потрібно проводити розрахунок в'язких напружень, швидкості зростання та схлопування кавітаційних бульбашок. Для цього рекомендовано використовувати рівняння Нав'є-Стокса [144] та методику Порицького [145]. Це необхідно для перевірки доцільності використання запропонованого способу руйнування гірських порід при зміні технологічних умов. До того ж, формування штучної тріщинуватості під дією магнітногідрокавітаційного навантаження виникає лише у тих свердловинах, де тиск на вибої не перевищує критичний тиск води $P_{кр}=22,1 \text{ МПа}$ [146]. За умови виникнення тиску вище критичного значення пароутворення у потоці рідини є неможливим, тобто кавітація не утворюється. При цьому тиск насиченої пари глинистої промивної рідини, що відповідає початку кавітаційного процесу 8320 Па при $t=323\text{K}$ [147].

5.2 Енергоємність руйнування при обертовому руйнуванні та обертово-гідрокавітаційному

Енергоємність руйнування E_p кварцитів Товкачівського ГЗК при традиційному обертовому руйнуванні та обертово-магнітногідрокавітаційному визначалась з формули, кВт·год/м³ [79]:

$$E_p = (P \cdot t) / V_n, \quad (5.3)$$

де P – потужність, спожита з мережі для руйнування гірської породи, кВт;

t – час руйнування, с;

V_n – об'єм зруйнованої породи, м³.

Середня потужність, спожита з мережі визначалась за допомогою ватметра Д-365 (ТУ 25-04.3295-77 [148]). Значення фіксувались кожні 4 секунди, що відповідає часу встановлення показань. Клас точності – 1.5. Перевагами є те, що він розрахований на роботу в умовах вібрацій з прискоренням 15 м/с² та частотою 30 Гц. Допустима дія ударів з прискоренням 70 м/с². Напруга живлення – 380 В, частота – 50 Гц, діапазон вимірювань до 30 кВт.

Час буріння свердловини визначався промисловим секундоміром ІВ-2 (ГОСТ 8.286-78 [149]). Вибір такого типу секундоміру обумовлений тим, що він адаптований до роботи на добувних виробництвах. Призначений для контролю часу роботи електромеханічних пристроїв. При проведенні досліджень енергоємності руйнування кварцитів при зміні магнітної індукції включений у лінію живлення бурової установки і синхронно вмикався і вимикався разом з роботою останньої. Це дозволило визначити час буріння свердловини з максимальною точністю – 0,01 с. Допустима напруга живлення – 380 В або 660 В, частота – 50 Гц.

Усі свердловини виконані у ході промислової апробації обертово-гідрокавітаційного руйнування гірських порід з МІФКП мали однакові глибини

$l_{ce}=15$ м та діаметр $D_{ce}=0,11$ м. Об'єм зруйнованої породи V_n при бурінні однієї свердловини, м³:

$$V_n = l_{ce} \cdot \left(\pi \cdot D_{ce}^2 / 4 \right) = 15 \cdot \left(3,14 \cdot 0,11^2 / 4 \right) = 0,14. \quad (5.4)$$

У табл. 5.3 Представлено результати досліджень енергоємності руйнування кварцитів Товкачівського кар'єру традиційним обертовим та запропонованим обертово-гідрокавітаційним способом з МІФКП при зміні магнітної індукції у кавітаторі. Діапазон та крок варіювання магнітної індукції прийняті (від 0 до 45 мТл з інтервалом 15 мТл). Це зроблено для промислової перевірки та підтвердження спадно-зростаючого характеру експериментальних лабораторних залежностей енергоємності руйнування гірських порід від магнітної індукції у дифузорі кавітатора робочого інструменту.

Таблиця 5.3 – Порівняння енергоємності руйнування кварцитів Товкачівського кар'єру обертовим та обертово-гідрокавітаційним способом з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку

Спосіб руйнування	Магнітна індукція у кавітаторі робочого інструменту B , мТл	Середня потужність, кВт	Час руйнування, год	Об'єм зруйнованої породи, м ³	Енергоємність, кВт·год/м ³
1	2	3	4	5	6
Обертний	-	3,45	3,85	0,14	97
Обертово-гідрокавітаційний з МІФКП	0	3,42	3,77	0,14	95
	15	3,27	3,72	0,14	87
	30	3,47	3,79	0,14	94
	45	3,44	3,78	0,14	93

З аналізу даних табл. 5.3 визначено, що мінімальна енергоємність руйнування кварцитів Товкачівського ГЗК спостерігається при магнітній

індукції у дифузорі кавітатора робочого органу 15 мТл. Це обумовлено дією магнітопластичного ефекту. Детально процес описаний у підрозділах 4.4-4.7.

Аналітична залежність $E_p=f(B)$, побудована на основі (4.12) та (4.13):

$$E_p = \frac{(38,2608 \cdot 10^{-8} \cdot \ln \left(\frac{A}{(50,1728 \cdot B^3 - 3,2622 \cdot B^2 + 0,0463 \cdot B + 0,0014) - 1,0391 \cdot 10^{-9}} \right) \cdot x}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}} \cdot x \frac{2 \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}}, \quad (5.5)$$

де A – коефіцієнт, обумовлений значенням питомої поверхневої енергії.

$$A = \frac{2 \cdot \hbar^4 \cdot \omega^4 \cdot l_{kp} \cdot N_a^2}{Y_0 \cdot d^4 \cdot m^2 \cdot H^2 \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta \cdot v_{np}^3 \cdot \zeta \cdot (-0.1078 \cdot l_2^2 - 0.0076 \cdot l_2 + 0.0016)}. \quad (5.6)$$

Аналітична залежність енергоємності руйнування кварцитів порівнювалась з залежністю, отриманою у промислових умовах Товкачівського ГЗК, рис. 5.1.

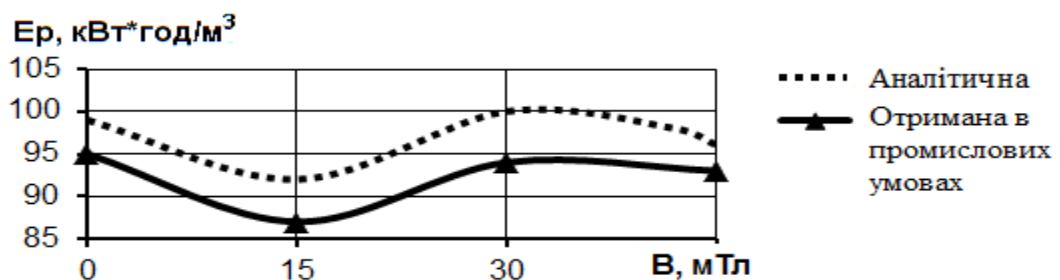


Рисунок 5.1 – Залежності енергоємності руйнування кварцитів Товкачівського ГЗК від значення магнітної індукції різця кавітаційного: аналітична та отримана в промислових умовах

Характер залежності $E_p=f(B)$, рис. 5.1, отриманої у промислових умовах Товкачівського ГЗК, співпадає з характером лабораторних залежностей,

описаних у підрозділі 4.7. Похибка досліджень залежності енергоємності руйнування кварцитів від зміни магнітної індукції різця кавітаційного не перевищує 6 %. Похибка обумовлена тим, що у реальних умовах масив знаходиться у напруженому стані, що не ураховано у математичній моделі. Для його урахування необхідно ускладнення моделі, що є не доцільним при отриманому значенні похибки.

При впровадженні запропонованого обертово-гідрокавітаційного руйнування гірських порід з МІФКП при магнітній індукції 15 мТл у дифузорі кавітатора робочого органу вдалось досягти зниження енергоємності на 12 %. Перевірка адекватності математичної моделі (5.6), проведена за критерієм Фішера F [150], в. о.

$$F \geq (S_{ad1}^2 / S_{ad2}^2), \quad (5.7)$$

де S_{ad1} та S_{ad2} – дисперсія адекватності теоретичної та експериментальної залежностей, відповідно, кВт·год/м³.

$$\begin{aligned} S_{ad1}^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \\ &= \frac{(99-97)^2 + (92-97)^2 + (100-97)^2 + (96-97)^2}{4-1} = 13; \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} S_{ad2}^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 = \\ &= \frac{(95-92)^2 + (87-92)^2 + (94-92)^2 + (93-92)^2}{4-1} = 13. \end{aligned} \quad (5.9)$$

де n та m – число ступенів свободи аналітичної та промислової залежностей, відповідно, шт.;

x_i та y_i – значення параметрів вибірки аналітичної та промислової залежностей, відповідно, кВт·год/м³;

\bar{x} та \bar{y} – середнє значення параметрів вибірки аналітичної та промислової залежностей, відповідно, кВт·год/м³.

Для умов промислового дослідження залежності енергоємності руйнування гірських порід від магнітної індукції кавітатора значення критерію Фішера з довірчою імовірністю 0,95: $F=6,39$, що ≥ 1 [150]. Отже, згідно критерію Фішера математична модель (5.6) адекватна.

5.3 Економічна ефективність промислового впровадження обертово-гідрокавітаційного руйнування гірських порід

Перевагами обертово-гідрокавітаційного руйнування гірських порід з МІФКП є те що: не вимагається додаткових витрат на модернізацію обладнання та зміну технологічних умов (потужності двигуна, діаметру штанги, швидкості різання тощо). Тому, рівень виробничих витрат умовно-постійних: на амортизацію, експлуатацію та утримання обладнання, на заробітну плату не зросли. До категорії витрат, що збільшились відносяться лише витрати на виготовлення різця кавітаційного, рис. 5.2. Додаткові витрати на різець кавітаційний (Патент UA № 101946 [151]) для впровадження обертово-гідрокавітаційного способу з МІФКП складають 4100 грн. і формуються з: витрат на проектування (1200 грн) і виготовлення оригінального інструменту (токарні роботи по виготовленню корпусу 1 з ріжучими кромками 4, дифузоров кавітатора 5 та промивним каналом 6 – 1050 грн., токарні роботи по виготовленню кожуху 3 – 340 грн.) та на матеріали (сталь 40 ХН – 350 грн., вставки твердосплавні 7 у кількості 14 шт.- 975 грн., магніти 2 – 225 грн.). Для кожуху та корпусу використано сталь марки 40 ХН за ГОСТ4543-71 [152], твердосплавні вставки виконано зі сплаву ВК8В, згідно ГОСТ Р 51047-97 [153] та ГОСТ Р 50300-92 [154]. Матеріал магнітів, розміщених у корпусі інструменту – 25БА170 за ГОСТ 24063-80 [155] (феритові магніти виготовлені на основі барію). Обрано саме такий тип магнітів, так як вони витримують високу робочу температуру в 723 К (450 °С), що актуально для умов нагрівання



Рисунок 5.2 – Різець кавітаційний 1 – корпус; 2 – магніти; 3 - кожух; 4 – ріжучі кромки; 5 – дифузор кавітатора; 6 – промивний канал; 7 – твердосплавні вставки

робочого інструменту в процесі тертя при бурінні. Перевагами обраного типу магнітів є здатність зберігати магнітні властивості в умовах: механічного руйнування, зміни тиску в межах від $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па до 0,3 МПа та вологості до 98 %. Також вони можуть працювати в умовах механічних навантажень, оскільки характеризуються високими міцнісними властивостями (межа міцності на стиснення (180...200) МПа), що у 3-5 разів перевищують властивості литих магнітів.

Економічний ефект від впровадження обертово-гідрокавітаційного способу з МІФКП досягається за рахунок зниження спожитої з мережі електроенергії P_m , кВт·год, що витрачається на руйнування одиниці об'єму гірської породи, табл. 5.4.

Вартість електроенергії для промислових споживачів Житомирської області, до яких відноситься Товкачівський ГЗК, відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 15.08.2005 р. № 745 «Про перехід до єдиних тарифів на електричну енергію, що відпускається споживачам» постановою НКРЕКП України від 26.05.2015 р. № 1619 затвердженою у травні 2015 року – вартість 1 кВт·год складає 119,48 коп. [156]. Кількість фінансових витрат на електроенергію при бурінні кварцитів Товкачівського кар'єру при обертовому та обертово-гідрокавітаційному руйнуванні з МІФКП визначено, як добуток енергоємності руйнування (табл. 5.4) та вартості одиниці кВт·год/м³ електроенергії для промислових підприємств. Результати занесені у табл. 5.5.

Таблиця 5.4 – Порівняння кількості фінансових витрат на електроенергію при обертовому та обертово-гідрокавітаційному способах руйнування кварцитів

Спосіб руйнування		Кількість фінансових витрат, грн.
1		2
Обертовий		115,90
Обертово-гідрокавітаційний з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку	V=0 мТл	113,51
	V=15 мТл	103,95
	V=30 мТл	112,31
	V=45 мТл	111,12

Таким чином, завдяки застосуванню гідрокавітаційного навантаження з МІФКП при реалізації обертово-гідрокавітаційного руйнування гірських порід на кварцитовому кар'єрі Товкачівського ГЗК вдалось знизити фінансові витрати електроенергії на руйнування кварцитів зі 115,90 грн./м³ до 103,95 грн./м³, тобто на 11 %.

Річний економічний ефект P_{ef} [157], грн./рік:

$$\begin{aligned}
 Ref &= ekC - E_n \cdot \partial\partial K = (C_1 - C_2) \cdot N_p - E_n \cdot \partial\partial K = \\
 &= (115,90 - 103,95) \cdot 1900 - 0,15 \cdot 4100 = 22090 \approx 22000
 \end{aligned}
 \tag{5.10}$$

де ekC – річна економія витрат (собівартості одиниці продукції), грн.;

$E_n=0,15$ – показник нормативної економічної ефективності рівня віддачі капіталовкладень [158], в. о.;

$\partial\partial K$ – додаткові капіталовкладення, грн.;

C_1, C_2 – собівартість одиниці продукції до і після впровадження запропонованого способу, грн.;

N_p – річна кількість одиниць продукції, шт.

Термін окупності від впровадження запропонованого способу, місяців:

$$Tok = (\partial\partial K \cdot 12) / ekC = (4100 \cdot 12) / 22000 = 2,2 \approx 2.
 \tag{5.11}$$

Зниження рівня виробничих витрат електроенергії є підставою для зниження цін на кварцити Товкачівського ГЗК, підвищення їх рентабельності та конкурентоспроможності.

5.4 Правила техніки безпеки та експлуатації при руйнуванні гірських порід різцем кавітаційним

При використанні різця кавітаційного перед кожною зміною машиніст повинен перевіряти закритість магнітів кожухом для уникнення небезпеки механічного руйнування магнітів та можливості ушкодження робітників їх уламками в процесі буріння.

Раз на тиждень перевіряти значення магнітної індукції у кавітаторі різця кавітаційного. У разі відхилення від норми (15 мТл) більше, ніж на 15%, демонтувати інструмент, зняти кожух та замінити магніти.

Перед заміною різця кавітаційного зупинити двигун і ввімкнути передачу у режим холостого ходу.

При використанні різця кавітаційного всі робочі, що працюють з буровим обладнанням зобов'язані проходити додатковий інструктаж керівника робочого процесу.

Незалежно від успішності проведення робіт різцем кавітаційним повний інструктаж робітників має проводитися два рази на рік.

Проходження повторного інструктажу повинно реєструватися в «Книзі інструктування робітників з техніки безпеки», а сама книга повинна зберігатися у керівника робочого процесу (начальник загону, буровий майстер, виконроб) або ж у інженера з техніки безпеки.

Керівник робочого процесу зобов'язаний принаймні один раз на декаду перевіряти дотримання техніки безпеки на місцях, а про результати перевірки звітувати в журналі зауважень.

Перш ніж почати роботу, машиніст бурової установки повинен перевірити справність двигуна, бурового насоса, а також всіх запобіжних пристроїв бурового обладнання.

Машиніст, який здає зміну, повинен сповістити про всі виявлені в ході роботи неполадки машиніста, що приймає зміну. Крім того, всі неполадки повинні бути відзначені буровим майстром в журналі здачі-приймання зміни.

У разі виявлення найменшої небезпеки для робітників, помічник бурового майстра або сам майстер особисто зобов'язані негайно вжити заходів. Якщо ж ліквідувати небезпеку немає можливості, роботу бурового обладнання необхідно припинити, після чого евакуювати персонал в безпечне місце та негайно сповістити начальника загону, виконроба або старшого майстра.

Висновки

1. Використанням гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку при реалізації обертово-

гідрокавітаційного руйнування гірських порід на кварцитовому кар'єрі Товкачівського ГЗК знижено енергоємність руйнування кварцитів з 97 кВт·год/м³ до 87 кВт·год/м³, та фінансові витрати на електроенергію зі 115,90 грн./м³ до 103,95 грн./м³ (11 %) при магнітній індукції магнітів різця кавітаційного 15 мТл.

3. Створено інструмент для реалізації обертово-магнітногідрокавітаційного способу руйнування гірських порід – Різець кавітаційний, Патент на корисну модель № 101946 МПК E21B 7/18

3. Річний економічний ефект від впровадження складає 22000 грн. у рік. Термін окупності 2 місяці.

4. За критерієм Фішера математична модель енергоємності руйнування гірських порід від значення магнітної індукції різця кавітаційного адекватна. Максимальна похибка складає 6 %.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, у якій вирішено прикладна задача зниження енергоємності руйнування гірських порід новим комбінованим енергозберігаючим обертово-гідрокавітаційним способом з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку та інструменту для його реалізації.

Основні наукові і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Отримано залежності питомої поверхневої енергії руйнування гірських порід: спадно-зростаючі від магнітної індукції в діапазоні від 15 мТл до 45 мТл та спадні від довжини дифузору кавітатора робочого інструменту від 10 мм до 50 мм та куті його розкриття 60^0 .

2. Встановлено, що закономірність енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії при бурінні з гідрокавітаційним навантаженням з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку спадає за логарифмічним законом:

– для граніту з $73 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ до $68 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ при зниженні питомої поверхневої енергії з $52,4 \text{ Дж}/\text{м}^2$ до $48,7 \text{ Дж}/\text{м}^2$;

– для гнейсу з $61 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ до $57 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ при зниженні питомої поверхневої енергії з $43,0 \text{ Дж}/\text{м}^2$ до $39,5 \text{ Дж}/\text{м}^2$.

3. Обґрунтовано режим гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку, що забезпечив зростання кількості локальних дефектів пружно-крихких гірських порід до 20 одиниць на 1 мм^2 , з середньою довжиною, шириною і глибиною відповідно 100, 10 і 5 мкм при магнітній індукції 15 мТл, куті розкриття дифузора 60^0 та його довжині 30 мм.

4. При гідрокавітаційному навантаженні гірських порід з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку магнітною індукцією 15 мТл:

а) модуль пружності I роду знизився для:

- граніту на 9 % зі 105,9 ГПа до 98,4 ГПа;
 - гнейсу на 8 % зі 153,6 ГПа до 141,2 ГПа;
- б) модуль пружності I роду зріс для:
- вапняку на 22 % від 51,8 ГПа до 66,3 ГПа;
 - пісковика на 38 % від 36,0 ГПа до 58,0 ГПа.

5. Запропоновано обертово-гідрокавітаційне руйнування гірських порід з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку та створено Різець кавітаційний (Патент № 101946 МПК E21B 7/18) для його реалізації. Його використання забезпечило зниження енергоємності руйнування пружно-крихких порід на 11 %.

6. Економічний ефект від впровадження обертово-гідрокавітаційного способу руйнування гірських порід з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку в виробничих умовах ПрАТ “Товкачівський гірничо-збагачувальний комбінат” складає 22 тисячі гривень у рік. Термін окупності 2 місяці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бондаренко В. И. Технология подземной разработки пластовых месторождений полезных ископаемых [Текст] / В. И. Бондаренко, А. М. Кузьменко, Ю. Б. Грядущий, В. А. Гайдук и другие. – Днепропетровск: Полиграфист, 2003. – 708 с. – ISBN 966-684-085-5.
2. Бритаев В. Л. Горные машины и комплексы [Текст] / В. Л. Бритаев, В. Ф. Замышляев. – М. : Недра, 1984. – 288 с.
3. Брылин В. И. Бурение скважин специального назначения [Текст] / В. И. Брылин. – Томск.: ТПУ, 2006. – 255 с.
4. Кучерявый Ф. И. Разрушение горных пород [Текст] / Ф. И. Кучерявый, Ю. М. Кожушко. – М. : Недра, 1972. – 240 с.
5. Гидромеханический способ разрушения горных пород и его практическое использование [Электронный ресурс] / Сайт ЗАТ «Талнах» - Режим доступа : http://www.talnah.ru/index_press_gidro.php – Заголовок з екрану.
6. Основные способы разрушения горных пород [Электронный ресурс] / Сайт «Бурение скважин» – Режим доступа: <http://burenie.by/?p=257#more-257> – Заголовок с экрана.
7. Меркело А. А. Особенности и классификация невзрывных способов разрушения материалов [Электронный ресурс] / А. А. Меркело. Режим доступа: <http://uran.donetsk.ua/~masters/publ2002/ggeo/merkelo.pdf> – Заголовок з екрану.
8. Козловская Т. Ф. Влияние поверхностно-активных веществ и их растворов на интенсивность дробления горных пород [Текст] / В. Д. Лемижанская, Я. С. Долударева // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: зб. наук. праць. – Кременчук : КрНУ, 2013. – Вип. 5 (82). – С. 124 – 129.
9. Anderson J. Discrete Mathematics with combinatorics [Текст] / J. Anderson. – Spartanburg: University of South Carolina, Prentice-Hall, 2001. – P. 960. – ISBN 0-13-086998-8.

10. Допплера эффект [Электронный ресурс] / Энциклопедия физики и техники. – Режим доступа: http://femto.com.ua/articles/part_1/1127.html – Заголовок з екрана.

11. Регель В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел. [Текст] / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский // Успехи физических наук, 1972. – Том 106, вып. 2. – С. 193-228.

12. Иоффе А. Ф. Деформация и прочность кристаллов [Текст] / А. Ф. Иоффе, М. Ф. Кирпичев, А. И. Левитская // Журнал русского физико-химического общества, 1924. – Вып. 22. – С. 286 – 293.

13. Фем'як Я. М. Підвищення ефективності руйнування гірських порід при бурінні свердловин за рахунок енергії пульсуючих потоків [Текст] : дис. к. т. н. : 05.15.10 / Ярослав Михайлович Фем'як. – Івано-Франківськ, 2007. – 122 с.

14. Пилипенко В. В. Экспериментальное определение длины кавитационной каверны и ее зависимости от угла диффузора трубки Вентури и режима ее работы [Текст] / В. В. Пилипенко, И. К. Манько // Газодинамика энергетических установок. – Киев: Наукова думка, 1982. – С. 39 – 43.

15. Westwood A. R., Chemomechanic Phenomena in Hard Rock Drilling [Текст] / A. R. Westwood, N. H. Makmillan, R. S. Kalyonen // – Trans. AJME, 1974. – Vol. 256. – P. 58 – 65.

16. Гершгал Д. А. Ультразвуковая технологическая аппаратура [Текст] / Д. А. Гершгал, В. М. Фридман. – М. : Энергия, 1976. – 320 с.

17. Перник А. Л. Проблемы кавитации [Текст] / А. Л. Перник. Л. : Судостроение, 1966. – 439 с.

18. Федоткин И. М. Использование кавитации в промышленности [Текст] / И. М. Федоткин, И. С. Гулый, Н. И. Шаповалюк. – Киев: Арктур, 1998. – 135 с. – ISBN 966-95344-2-9.

19. Кучеренко В. А. Энциклопедия современной техники. Строительство [Текст] / В. А. Кучеренко. – М. : Советская энциклопедия, 1964. – 544 с.

20. Козлов В. И. Ларморова прецессия [Текст] / В. И. Козлов. – Лабораторный практикум по общей физике. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2006. – 14 с.
21. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности [Текст] / П. М. Сиденко. – М. : Химия, 1977. – 356 с.
22. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids [Текст] / A. A. Griffith // Philosophical Transaction of the Royal Society of London, 1921. – Series A, vol. 221. – P. 163-198.
23. Irvin G. R. Fracture [Текст] / G. R. Irvin // Springer encyclopedia of physics, 1958. – Vol. 6. – P. 551-590.
24. Партон, В. З. Механика разрушения: От теории к практике [Текст] / В.З. Партон. – М. : Наука, 1990. – 240 с. – ISBN 978-5-382-00157-9.
25. Журков С. Н. О прогнозировании разрушения горных пород [Текст] / С. Н. Журков, В. С. Куксенко, В. А. Петров и др. // Изв. АН СССР, 1977. – Серия Физика земли № 6. – С. 11 – 18.
26. Пестриков В. М. Механика разрушения твердых тел [Текст] / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – Санкт-Петербург : Профессия, 2002. – 300 с. – ISBN: 5-93913-022-4.
27. Морозов Е. М. Механика деформируемых тел и конструкций [Текст] / Е. М. Морозов. – М. : Машиностроение, 1975. – 476 с.
28. Irvin G. Analysis of Stresses and Straines Near the End of Crack Traversing a plate [Текст]/ G. Irvin // J. Appl. Mech., 1957. – Vol. 24, № 3. – P. 361 – 364.
29. Обреимов И. В. О прочности слюды на разрыв по плоскости спайности. Исследования по экспериментальной и теоретической физике (памяти О. Ландсберга) [Текст] / И. В. Обреимов, Е. С. Терехов // М.: Изд. АН СССР, 1959. – С. 159 – 169.
30. Orowan E. Fracture and strength of solids [Текст] / E. Orowan // Reports Progn. Phys, 1948. – № 12. – P. 185 – 232.

31. Владимиров В. И. Физическая теория прочности и пластичности металлов [Текст] / В. И. Владимиров. – М. : ЛПИ, 1975. – 206 с.
32. Яковлев П. В. Обоснование критерия прочности при расчетах зубчатых передач [Текст] / П. В. Яковлев // Казанская наука, 2010. – Вып. №4. – С. 16 - 22. – ISSN 2078-9955.
33. Гарипов Т. Т. Моделирование процесса гидроразрыва пласта в пороупругой среде [Текст] / Т. Т. Гарипов // Математическое моделирование, 2006. – Том 18, № 6. – С. 53-69.
34. Горюнов Ю. В. Скачкообразный рост трещин в монокристаллах при растяжении в контакте / Ю. В. Горюнов, Г. И. Деньщиков, Л. С. Солдатенкова, Б. Д. Сумм // ДАН СССР, 1978. – Том 24, №2. – С. 327-329.
35. Вакуленко А. А. О распространении трещин в полимерах [Текст] / А. А. Вакуленко // Механика эластомеров, 1978. – Том 2, вып. 268. – С. 5 – 12.
36. Кичигин А. Ф. Основы функционирования системы забой – горная машина [Текст] / А. Ф. Кичигин, О. М. Терентьев. – К. : УМК ВО, 1989. – 223 с.
37. Смирнов Б. С. Кластеры с плотной упаковкой [Текст] / Б. С. Смирнов // Успехи физических наук, 1992. – Том 162, № 1. – С. 119 – 138.
38. Смирнов Б. М. Скейлинг в атомарной и молекулярной физике [Текст] / Б. М. Смирнов // Успехи физических наук, 2001. – Том 171, № 12. – С. 1291 – 1315.
39. Странский И. Н. К теории роста кристаллов и образования кристаллических зародышей [Текст] / И. Н. Странский, Р. Каишев // Успехи физических наук, 1939. – Том 21, № 4. – С. 408 – 465.
40. Gilliman J. J. Dislocation dynamics and the response of material to impact [Текст] / J. J. Gilliman // Appl. Mech. Rev., 1968. – Vol. 21, No. 8. – P. 767 – 783.
41. Терентьев О. М. Класифікація комбінованих способів руйнування гірських порід графами [Текст] / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: зб. наук. праць. – Кременчуг: КрНУ, 2013. – Вип. 2 (12). – С. 74 – 80. Включено до «Index Copernicus».

42. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.

43. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов [Текст] / Д. Финни; под. ред. академика Ю. В. Линника. – М. : 1970. – 287 с.

44. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

45. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии [Текст] / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – К.: Вища школа, 1976. – 184 с.

46. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке [Текст] / Н. Джонсон, Ф. Лион ; под ред. к.т.н. Э.К. Лецкого, д.т.н. Е.В. Марковой. – М. : Мир – 1981 г. – 516 с.

47. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман, Э. К. Лецкий, В. Шеффер ; под ред. к.т.н. Э. К. Лецкого. - М.: Мир, 1977. – 552 с.

48. Жирабок А. Н. Планирование эксперимента для построения математических моделей [Текст] / А. Н. Жирабок // Соросовский образовательный журнал, 2001. – Том 7, № 9. – С. 121 – 127.

49. Аністратенко В. О. Математичне планування експериментів в АПК: [Текст] / В. О. Аністратенко, В. Г. Федоров. - К.: Вища школа, 1993. – 375 с. – ISBN 5-11-002551-1.

50. ГОСТ 50864-96. Резьба коническая замковая для элементов бурильных колонн. Профиль, размеры, технические требования [Текст]. Взамен ГОСТ 28487-90 ; введ. в действие 1996-03-01.– М.: Госстандарт России, 1996. – 15 с.

51. Выпрямитель ВСА-5К [Электронный ресурс] / Сайт «Специальные технические системы» – Режим доступа: http://www.bm7.ru/view_pribor-temp2.php?id=800 – Заголовок з екрану.

52. Тесламетр магнитометр [Електронний ресурс] / Сайт «Магниты неодимовые» – Режим доступа: <http://magnet34.ru/teslametr.html> – Заголовок з екрану.

53. ГОСТ 24936-89. Магниты постоянные для электротехнических изделий. Общие технические требования [Текст]. Введ. в действие 1989-10-16 – М. : Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1989. – 24 с.

54. ГОСТ Р 51047-97. Резцы для очистных и проходческих комбайнов. Общие технические условия [Текст]. Введ. в действие 1997-04-08. – М. : Госстандарт России, 1997 – 25 с.

55. ГОСТ Р 50300-92. Резцы токарные со сменными режущими пластинами из сверхтвердых материалов. Технические условия [Текст]. Введ. в действие 1994-01-01. – М.: Госстандарт России, 1994 – 11 с.

56. Булгаков А. Б. Улучшение свойств жидких топлив гидромеханической обработкой в кавитационном поле [Текст] / А. Б. Булгаков. – М.: Недра, 1996. – 193с. ISBN 5-247-03495-3.

57. Иванов В. М. Парогазовые процессы и их применение в народном хозяйстве [Текст] / В. М. Иванов. – М.: Наука, 1970. – 320с.

58. Штеренлихт Д. В. Гидравлика [Текст] / Д. В. Штеренлихт – М.: Энергоатомиздат, книга 1, 1995. – 351 с.

59. Скирденко О. І. Визначення кількості дубльованих дослідів при дослідженні міцності епоксидокомпозитного з'єднання деталей машин [Текст] / О. І. Скирденко // Науковий вісник ХДМІ, 2011. – Вип. 2 (5). – С. 278 – 283.

60. Бобилев В.П. Основи наукових досліджень [Текст] / В. П. Бобилев, І. І. Іванов, Я. В. Стовба. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2010. – 48 с.

61. Терентьев О. М. Планування експериментальних досліджень зміни питомої поверхневої енергії гірських порід при руйнуванні обертово-гідрокавітаційним способом [Текст] / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова // Енергетика: економіка, технології, екологія, 2014. – Спецвипуск. – С. 77 – 84.

62. Горюнов Ю. В. Скачкообразный рост трещин в монокристаллах при растяжении в контакте [Текст] / Ю. В. Горюнов, Г. И. Деньщиков, Л. С. Солдатенкова, Б. Д. Сумм // ДАН СССР, 1978. – Том 24, №2. – С. 327 – 329.

63. Шаскольская М. П. Кристаллография [Текст] / М. П. Шаскольская. – М. : Высшая школа, 1984. – 376 с.

64. Кривцов А. М. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела [Текст] / А. М. Кривцов, Н. В. Кривцова // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН, 2002. – Том 3, № 2. – С. 254 – 276.

65. Сумм Б. Д. Новые корреляции поверхностного натяжения с объемными свойствами жидкостей [Текст] / Б. Д. Сумм // Вестник Московского Университета, серия «Химия», 1999. – Том 40, № 6. – С. 400 – 405.

66. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии [Текст] / Д. Бакли. – М.: Машиностроение, 1986 г. – 360 с.

67. Терентьев О. М. Фізико-технічні основи видобутку корисних копалин з енергоощадним руйнуванням молекулярних зв'язків гірських порід: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня д-ра техн. Наук : спец. 05.15.03 «Відкрита розробка родовищ корисних копалин» [Текст] / Терентьев Олег Маркович; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – Київ, 2008. – 38 с.

68. Спиридонов О. П. Фундаментальные физические постоянные [Текст] / О. П. Спиридонов. – М.: Высшая школа, 2001. – 238 с.

69. Терентьев О. М. Урахування міцності молекулярних зв'язків гірських порід при виборі робочих органів для її руйнування [Текст] / О. М. Терентьев // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Гірництво», 2010. – Вип. 19. – С. 36 – 44.

70. Кичигин А. Ф. Основы функционирования системы забой – горная машина [Текст] / А. Ф. Кичигин, О. М. Терентьев. – К.: УМК ВО, 1989. – 223 с.

71. Боброва М. Е. Моделирование поля деформаций и зон дилатансии в упругом полупространстве с комбинацией двойных сил [Текст] / М. Е. Боброва,

А. С. Пережогин // Вестник КРАУНЦ, Физ.-мат. науки, 2011. – Вип. № 1(2). – С. 31 – 36.

72. Гарбер Р. И. Физика прочности кристаллических тел [Текст] / Р. И. Гарбер, И. А. Гиндин // Успехи физических наук, 1960. – Том 80, № 1. – С. 57 – 106.

73. Протасов Ю. И. Разрушение горных пород [Текст] / Ю.И. Протасов. – М.: Горная книга, 2009. – 453 с.

74. Петров В. А. Физические основы промышленной безопасности [Текст] / В. А. Петров // Санкт-Петербург: Наука и техника, 2005. – Вип. 9. – С. 17 – 19.

75. Пилипенко А. Т. Справочник по элементарной химии [Текст] / А. Т. Пилипенко, В. Я. Починок, И. П. Середа, Ф. Д. Шевченко. – К.: Наукова думка, 1985. – 560с.

76. Расчёт магнитной индукции катушки [Электронный ресурс] / Сайт «Электротехника» – Режим доступа: http://electe.blogspot.com/2011/07/blog-post_27.html – Заголовок з екрану.

77. Магнитная постоянная [Электронный ресурс] / Сайт «Вікіпедія» – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитная_постоянная. – Заголовок з екрану.

78. Магнетон Бора [Электронный ресурс] / Сайт «Вікіпедія» – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Магнетон_Бора. – Заголовок з екрану.

79. Рогальський Б.С. Контроль електроспоживання гірничих машин і технологічних властивостей гірських порід [Текст] / Б.С. Рогальський, Ю.П. Войтюк. – Вінниця: Універсум, 2009. – 81 с. – ISBN 978-966-641-298-3.

80. Булгаков А. Б. Улучшение свойств жидких топлив гидромеханической обработкой в кавитационном поле [Текст] / А. Б. Булгаков. – М. : Недра, 1996. – 193 с. – ISBN 5-247-03495-3.

81. Иванов В. М. Парогазовые процессы и их применение в народном хозяйстве [Текст] / В. М. Иванов. – М. : Наука, 1970. – 320с.

82. Витікання рідини із отворів і насадок [Електронний ресурс] / Гідрогазодинаміка в прикладах. – Режим доступу: http://posibnyky.vntu.edu.ua/gidro_gazo_dunamika/page42.html. – Заголовок з екрану.

83. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы [Учебник] / Т.М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов. – М. : Машиностроение, 1982. – 424 с.

84. Повх И.Л. Техническая гидромеханика [Текст] / И. Л. Повх. – Л. : Машиностроение, 1976 г. – 504 с.

85. Пилипенко В. В. Кавитационные автоколебания [Учебное пособие] / В. В. Пилипенко. – К.: Наукова думка, 1989. – 316 с.

86. Гейер В. Г. Гидравлика и гидропривод [Текст] / В. Г. Гейер, В. С. Дулин, А. Н. Заря. - М. : Недра, Учебник для ВУЗов – 3-е издание, 1991.– 331 с.

87. Терентьев О. М. Поверхностная энергия горных пород [Текст] / О. М. Терентьев, И. Н. Стрельцова. – Проблемы недропользования. Международный форум-конкурс молодых ученых: Сб. науч. Трудов. Часть 1. 24-26 апреля 2013 г. – Санкт-Петербург : Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». С. – 195 – 197.

88. Терентьев О. М. Выбор параметров управления удельной поверхностной энергией разрушения горных пород [Текст] / О. М. Терентьев, И. М. Стрельцова. – Перспективы развития горного дела и подземного строительства: материалы V междунар. науч.-техн. конф. «Энергетика. Экология. Человек», 23 – 24 мая 2013 г. Вып. № 4. - К. : НТУУ «КПИ». – С. 188 – 192.

89. Терентьев О. М. Математична модель управління питомою поверхневою енергією руйнування гірських порід [Текст] / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського: зб. наук. праць. – Кременчук : КрНУ, 2013. – Вип. 3 (80). – С. 153 – 157. Включено до «Index Copernicus».

90. Терентьев О. М. Геометрические и частотные параметры генерации импульсов вращательно-гидрокавитационного инструмента [Текст] / О. М.

Терентьев, И. Н. Стрельцова // Theoretical & Applied Science. Materials of the International Scientific Practical Conference 28.02.2014. Shveden, Linkoping. – P. 54 – 59. Включено до «Google Scholar».

91. Терентьев О. М. Энергоемкость разрушения горных пород комбинированным механико-гидрокавитационным способом [Текст] / О. М. Терентьев, И. Н. Стрельцова // Theoretical & Applied Science. Materials of the International Scientific Practical Conference 30.12.2013. Serbia, Neoplanta. – P. 22 – 26. Включено до «Google Scholar».

92. Мельников Н. В. Справочник (Кадастр) физических свойств горных пород. [Текст] / Под редакцией Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодяконова. – М. : Недра, 1975. – 279 с.

93. LZS – 2 станок для изготовления кругло-фасонных изделий [Электронный ресурс] / Сайт «Канатные машины SZJ mini» – Режим доступа: <http://www.cubimport.com.ua/oborudovanie/oborudovanie-dlya-izgotovleniya-fasonnyh-izdeliy/lzs-2-stanok-dlya-izgotovleniya-kruglo> – Заголовок з екрану.

94. Мостовой станок для шлифовки и полировки гранита, мрамора QM300X110/300X130. [Электронный ресурс] / Сайт «allbiz» – Режим доступа: <http://191117.ru.all.biz/> – Заголовок з екрану.

95. Водопьянов В. И. Упругие свойства металлов. Методические указания к лабораторной работе [Текст] / В. И. Водопьянов, О. В. Кондратьев, А. А. Белов. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2010. – 16 с.

96. Корисні копалини України [Электронный ресурс] / Сайт «Вікіпедія» – Режим доступу : http://uk.wikipedia.org/wiki/Корисні_копалини_України – Заголовок з екрану.

97. Месторождения Украины. Капустинское месторождение гранита[Электронный ресурс] / Сайт «Компания Сити камень» – Режим доступа: <http://citystone.su/?level=2&id=5> – Заголовок з екрану.

98. Арсланова Х. А. Геологический словарь [Текст]: Т. 2 Н-Я / Х. А. Арсланова, М. Н. Голубчина, А. Д. Искандерова и др.; под ред. К. Н. Паффенгольца. – М. : Недра, 1978. – 456 с.
99. Кнунянц И. Л. Химическая энциклопедия [Текст] Т. 2. / И. Л. Кнунянц. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – 673 с.
100. Кнунянц И. Л. Химическая энциклопедия [Текст] Т. 4. / И. Л. Кнунянц. – М.: Советская энциклопедия, 1995. – 641 с.
101. Биотит [Электронный ресурс] / Сайт «Каталог минералов» – Режим доступа: <http://www.catalogmineralov.ru/> – Заголовок з екрану.
102. Кучеренко В. А. Энциклопедия современной техники. [Текст]. Т. 1 Строительство / В. А. Кучеренко. М.: Советская энциклопедия, 1964. – 562 с.
103. Технологія видобування вапняку [Електронний ресурс] / Сайт «Українська асоціація вапняної промисловості» – Режим доступа: <http://limeindustry.in.ua/uk/analytics/show/4> – Заголовок з екрану.
104. Песчаник [Электронный ресурс] / Сайт «Горная энциклопедия» – Режим доступа: <http://www.mining-enc.ru/p/peschanik/> – Заголовок з екрану.
105. Арцимович Л. А. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях [Текст]/ Л. А. Арцимович, С. Ю. Лукьянов. – М. : Наука, 1978. – 224 с.
106. Ланге В. Н. Физики и физические явления [Текст] / В. Н. Ланге, под редакцией академика АН МССР С. И. Радауцана. – Кишинева : Штиинца, 1985. – 127 с.
107. Кнэпп Р. Кавитация [Текст] / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М.: Мир, 1974. – 678 с.
108. Пирсол И. Кавитация [Текст] / И. Пирсол. – М.: Мир, 1975. – 96 с.
109. Oliver W. Improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments [Текст]/ W. Oliver, G.Pharr // Journal of materials research, 1992. – Vol. 7, № 6. – P. 1564 – 1583.

110. Звіт про геологічне вивчення надр пісковиків Ямпільського району Вінницької області. [Електронний ресурс] / Сайт «Песчаник» - Режим доступу: <http://www.peschanik.com/kharakteristika-kamnya.html> – Заголовок з екрану.

111. Середа Н. Г. Бурение нефтяных и газовых скважин [Текст] / Н. Г. Середа, Е. М. Соловьев. – М. : Недра, 1974, 456 с.

112. Опыт эксплуатации установки измерения скорости УЗК «УИСУ-01» [Електронний ресурс] / Сайт «ОКО» Ассоциация – Режим доступу: <http://ndt.com.ua/support/standardization/uisu-01> – Заголовок з екрану.

113. Дортман Н. Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. [Текст] / Н. Б. Дортман. – М. : Недра, 1964. – 325 с.

114. Головин Ю. И. Магнитопластичность твердых тел [Текст]/ Ю. И. Головин // Физика твердого тела, 2004. – Т. 46, вып. 5. – С. 769 – 803.

115. Закупин А. С. Особенности спектров и параметров потока акустоэмиссионных сигналов при воздействии электромагнитного поля на нагруженные образцы [Текст] / А. С. Закупин, Л. М. Богомолов, Г. С. Закупина, В. А. Мубассарова и др. // Петропавловск-Камчатский, ИКИР ДВО РАН, 2007. – С. 84 – 90.

116. Олейнич-Лысюк А. В. Особенности магнитопластического эффекта в бериллиевом конденсате [Текст]/ А.В. Олейнич-Лысюк, Н.Д. Раранский // Физика твердого тела, 2012. – Том 54, Вып. 3. – С. 417 - 421.

117. Альшиц В. И. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля [Текст] / В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Т. М. Перекалина и др. // ФТТ, 1978. – Вип. 2. – С. 467 – 471.

118. Даринская Е. В. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы, диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук: 01.04.07 [Текст] / Елена Владимировна Даринская, 2004. – 280 с.

119. Федоткин И. М. Кавитация. Кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Часть I [Текст] / И. М. Федоткин, И. С. Гулый // К. : Полиграфкнига, 1997. – 840 с.

120. Федоткин И. М. Роль электронного потенциала в зарождении паровой фазы на металлических поверхностях [Текст] / И. М. Федоткин, Ю. И. Федоткин // К. : Наукова думка, сборник «Конвективный перенос», 1982. – С. 105 – 110.

121. Френкель Я. И. Об электрических явлениях, связанных с кавитацией, обусловленной ультразвуковыми колебаниями в жидкости [Текст] / Я. И. Френкель // Журнал физической химии, 1940. – Том 14, вып. 3, 1940. – С. 305 – 308.

122. Frenkel J. On electrical phenomena associated with cavitation due to ultrasonic vibrations in liquids [Текст]/ J. Frenkel // Acta physicochimica URSS. – Vol. 12, No 31, 1940. – P. 317 – 322.

123. Классен В. И. Омагничивание водных систем [Текст]/ В. И. Классен – М.: Химия, 1982. – 296 с.

124. Классен В. И. Вода и магнит [Текст]/ В. И. Классен. – М.: Наука, 1973. – 111 с.

125. Бондаренко Н. Ф. Электромагнитные явления в природных водах [Текст] / Н. Ф. Бондаренко, Е. З. Гак. - Л. : Гидрометеоиздат, 1984. – 152 с.

126. Тажибаев К.Т. Поверхностная энергия минералов и горных пород / К.Т. Тажибаев, Р.М. Султаналиева, А.Т. Конушбаева // Известия КГТУ им. И.Раззакова 29/2013. – 2013. – С. 8.

127. Моргунов Р. Б. Магнитопластичность и магнитная пам'ять в диамагнитных твердых телах [Текст] / Р. Б.Моргунов, А. Л. Бучаченко // ЖЭТФ, 2009. – Том 136, вып. 3(9). – С. 505 – 515.

128. Ржевский В. В. Основы физики горных пород [Текст]/ В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. – М.: Недра, 1978. – 390 с.

129. Петров В. А. Физические основы промышленной безопасности [Текст] / В. А. Петров. – Санкт-Петербург: Наука и техника, 2005. – Вып. №9. – С. 17 – 19.

130. Адамова Л. В. Процессы на поверхности раздела фаз [Текст] / Л. В. Адамова. – Екатеринбург, Уральский государственный университет им. А. М. Горького, конспект лекций, 2007. – 125 с.

131. Terentiev O. Mechanism of creating the prefracture zone of rock formations with magnetic and hydrocavitation load [Text] / O. Terentiev, I. N. Streltsova, A. J. Kleshchev // Metallurgical and Mining industry, ISSN 2076-0507, Dnipropetrovsk, 2015. – No. 4. – P. 353 – 355. Включено до «Scopus».

132. Терентьев О. М. Ослаблення масиву гірських порід магнітно-гідрокавітаційним навантаженням [Текст] / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова, М. І. Закієв // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: зб. наук. праць. ISSN 2074-1537 – Кременчук : КрНУ, 2015. – Вип. 1/2015 (15). – С. 18-24. Включено до «Index Copernicus».

133. Терентьев О. М. Зниження енергоемності руйнування гірських порід за рахунок використання енергії прецесуючого кавітаційного потоку [Текст] / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова. – Сталий енергетичний розвиток: сучасні тенденції, технології та рішення. Збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної та навчально-методичної конференції 24.09.2014. К.: Національний технічний університет України «КПІ». – С. 52.

134. Терентьев О. М. Комбінований енергозберігаючий обертово-гідрокавітаційний спосіб руйнування гірських порід [Текст] / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова. – II Аспірантські читання пам'яті Праховника А. В. 16-17 квітня, 2014, К. – Інститут енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ». – С. 29 – 30.

135. Терентьев О. М. Питома поверхнева енергія, як один з ключових параметрів руйнування гірських порід [Текст] / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова. - Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина». Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «КПІ», Київ, 2015. – С. 414 – 418.

136. Мусанов А., Буровое оборудование компании Атлас Копко [Текст] / А. Мусанов, А. Шалбай. – Алматы, 2005. – 130 с.
137. Волков А. С. Вращательное бурение разведочных скважин [Текст] / А.С. Волков. – М: Недра, 1988. – 320 с.
138. Кузнецова Е. В. Математическое планирование эксперимента [Текст] / Е. В. Кузнецова. – Пермь, 2011. – 33 с.
139. ГОСТ 33213-2014 Контроль параметров буровых растворов в промысловых условиях. Растворы на водной основе [Текст]. Введ. 2014-08-01. – Москва: Стандартинформ. – 2014. – 127 с.
140. ГОСТ 25795-83 Сырье глинистое в производстве глинопорошков для буровых растворов [Текст] Введ. 1983-01-01. – Москва: Издательство стандартов, 2009, 5 с.
141. ГОСТ 8433-81 Вещества вспомогательные ОП-7 и ОП-10. Технические условия [Текст]. Введ. 2014-02-24. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 16 с.
142. Шамо́в Н. А. Волновые процессы в технологии приготовления буровых растворов [Текст] / Н. А. Шамо́в, В. Ю. Артамонов // М.: Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2013. – Вып. №3. – С. 56 – 65.
143. Вязкость воды [Электронный ресурс] / Сайт «Аналитическая химия» - Режим доступа: <http://www.novedu.ru/sprav/vis-h2o.htm> – Заголовок з экрану.
144. Те́мам Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ. [Текст]/ Р. Те́мам. – М.: Мир, 1981. – 408 с.
145. Poritskty H., The collapse or growth a spherical bubble or cavity in a viscous fluid [Текст]/ H. Poritskty. – Proc. First U. S. Natl. Congr. Appl. Mech. (ASME), 1952. – P. 813 – 821.
146. Ибра́гимов Л. Х. Теория и практика применения затопленных скоростных турбулентных струй и вскипающих адиабатных потоков для воздействия на призабойные зоны скважин [Текст] /. Л. Х. Ибра́гимов. М.: ВНИИОЭНГ, 1977. – 112 с.

147. Навроцький Б. І. Технічна механіка рідини [Текст] / Б. І. Навроцький, Є. І. Сухін. Київ, 1999. – 374 с.
148. Ваттметр Д 365 [Електронний ресурс]/ Сайт «ФЛП Котляров С. С.» - Режим доступу: <http://rele.in.ua/index.php/tovar/elektroizmeritelnye-pribory/d365/d365-60kvt-detail.html> – Заголовок з екрану.
149. ГОСТ 8.286-78 Государственная система обеспечения единства измерений. Секундомеры электрические. Методы и средства поверки [Текст]. Введ. 1979-01-01. – Москва: Издательство стандартов, 1978. – 6 с.
150. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика [Текст] / А. И. Кобзарь – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
151. Патент України «Різець кавітаційний» UA № 101946. МПК E21B 7/18.
152. ГОСТ 4543-71 Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия [Текст]. Введ. 1973-01-01. – Москва: Издательство стандартов, 1971. – 40 с.
153. ГОСТ Р 51047-97 Резцы для очистных и проходческих комбайнов. Общие технические условия [Текст]. Введ. 1997-05-15. – Москва: Госстандарт России, 1997. – 20 с.
154. ГОСТ Р 50300-92 Резцы токарные со сменными режущими пластинами из сверхтвердых материалов. Технические условия [Текст]. Введ. 1992-01-01. – Москва: Госстандарт России, 1992. – 46 с.
155. ГОСТ 24063-80 Ферриты магнитотвердые. Марки и основные параметры. [Текст]. Введ. 1980-07-01. – Москва: Издательство стандартов, - 1980. – 14 с.
156. Тарифи на електричну енергію [Електронний ресурс] / Сайт «Житомиробленерго». – Режим доступу: <http://www.ztoe.com.ua/tariff.php>.
157. Богдан Н. М. Інноваційний менеджмент [Текст] / Н. М. Богдан // Х. – Харківська національна академія міського господарства, Методичні вказівки, 2012. – 20 с.

158. Терентьев О. М. Энергоемность та питома поверхнева енергія руйнування гірських порід магнітно-гідрокавітаційним навантаженням [Текст] / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво", 2015. – Вип. 28. – С. 29 – 35. Включено до «Google Scholar».

Додаток А

Енергоємність різних способів руйнування гірських порід

Спосіб руйнування	Питома енергоємність руйнування [3], МДж/м ³
1	2
Ударний	200–630
Обертовий	600–950
Ударно - обертовий	400–600
Обертово - ударний	600–800
Вибуховий	200–400
Гідравлічний	1000-2000
Гідроімпульсний	70-100
Електрогідравлічний	400-500
Електротермічний	5000
Електроімпульсний	100-200
Вогневий	1500
Плазмовий	5000
Термошарошковий (термомеханічний)	1200–1600
Електротермомеханічний	500–800

Додаток Б
Магнітомір НТ20



Рисунок Б.1 – Магнітомір НТ20

Додаток В

Наноіндентометр «Мікрон – Гамма»

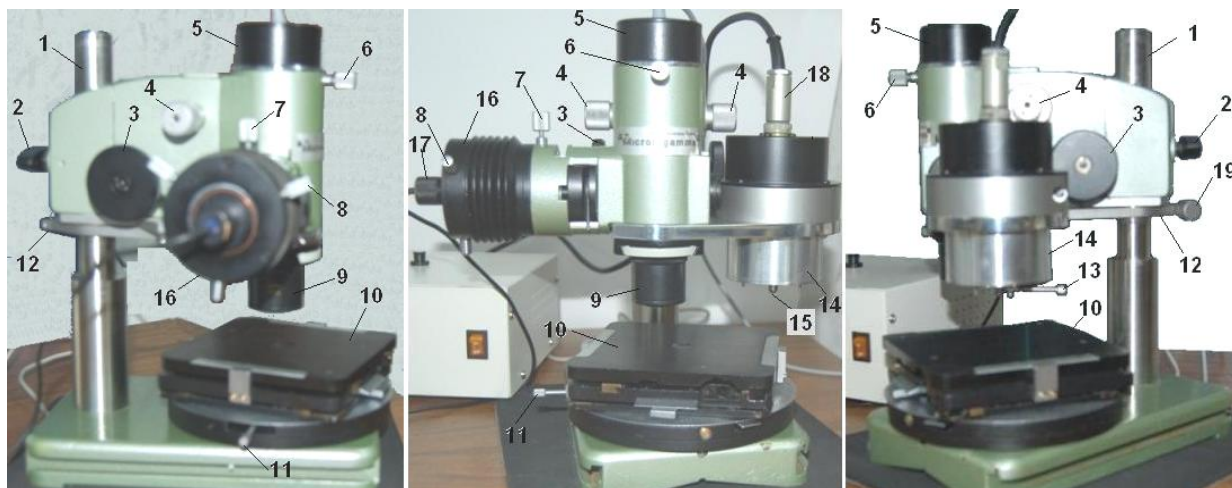


Рисунок В.1 – Наноіндентометр «Мікрон – Гамма» (1 – стійка, 2 – ручка фіксації мікроскопа на стійці, 3 – ручка грубого переміщення мікроскопа та індентора, 4 – ручка точного переміщення мікроскопа, 5 – відеокамера, 6 – гвинт кріплення камери, 7 – гвинт кріплення освітлювача, 8 – центруючі гвинти освітлювача, 9 – об'єктив, 10 – двохкоординатний стіл, 11 – гвинт фіксації повороту стола, 12 – обмежувач прицільного уколу, 13 – рукоятка щупа, 14 – блок навантаження, 15 – індентор, 16 – освітлювач мікроскопа, 17 – патрон з лампою, 18 – роз'єм головки, 19 – гвинт фіксації обмежувача.)

Додаток Г
Рентгеноструктурний дифрактометр «Regaku Ultima IV»

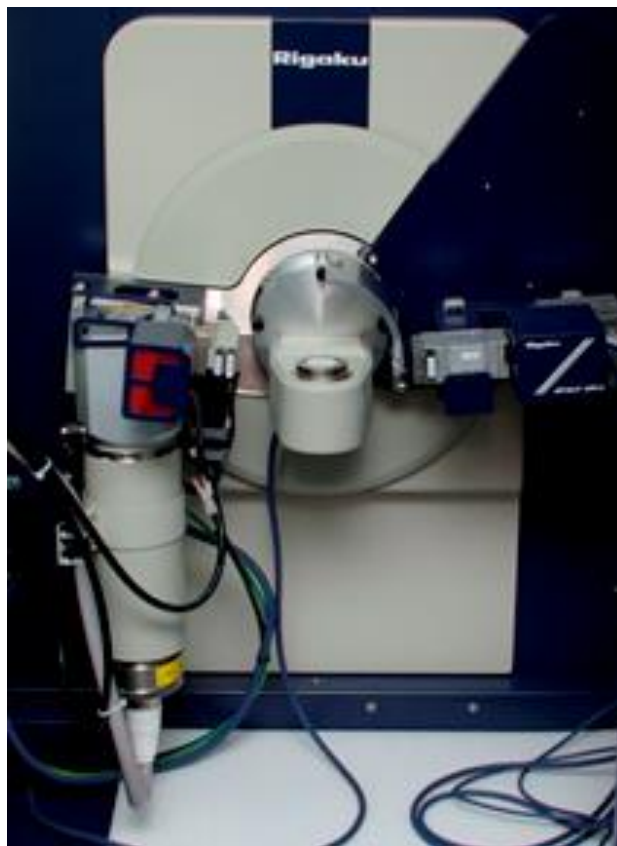


Рисунок Г.1 – Рентгеноструктурний дифрактометр «Regaku Ultima IV»

Додаток Е

Результати хімічного аналізу обраних видів зразків гірських порід

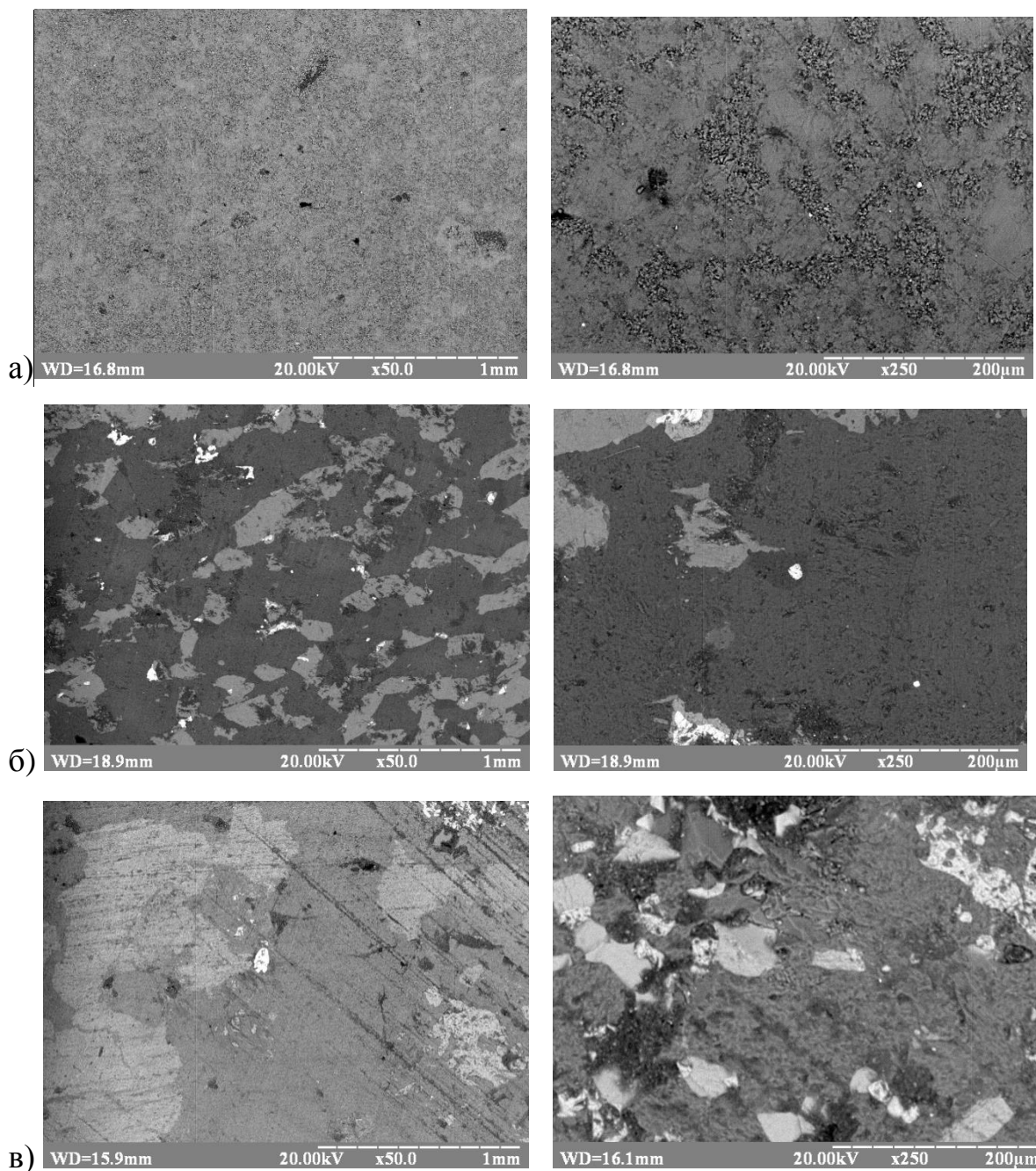


Рисунок Е.1 – Фото зразків порід до руйнування в масштабі 1:50 та 1:250 (1 мм та 200мкм в одній поділіці, відповідно) а) – вапняк; б) – гнейсу; в) – граніт

Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	Погр. %	C %	C-Pur %	ZAF	ZAF-Pur	Валент.	Атом. %	Кэф.	Текст
Al	K 32	20.02	0.54	99.90	1.4798	1.0003	3	0.000	0.000	
Si	K 219	5.81	3.26	99.99	1.4381	1.0000	4	0.000	0.000	
P	K 378	4.33	6.87	29.26	1.0032	0.5202	5	0.000	0.000	
S	K 92	11.63	1.90	13.74	0.9354	0.6165	6	0.000	0.000	
Ca	K 5065	5.15	87.43	51.33	0.9367	0.9304	2	0.000	0.000	
Ca	L 0	71.06	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	

а)

Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	Погр. %	C %	C-Pur %	ZAF	ZAF-Pur	Валент.	Атом. %	Кэф.	Текст
Al	K 40	47.08	1.38	99.90	1.1243	1.0003	3	0.000	0.000	
Si	K 2151	4.38	65.79	99.99	1.0800	1.0000	4	0.000	0.000	
S	K 240	14.48	15.28	13.74	0.4684	0.6165	6	0.000	0.000	
Ca	K 66	8.60	2.34	51.33	0.7031	0.9304	2	0.000	0.000	
Ca	L 0	151.31	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	
Fe	K 243	4.09	15.22	99.90	0.7980	1.0000	2	0.000	0.000	
Fe	L 1	38.55	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	

б)

Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	Погр. %	C %	C-Pur %	ZAF	ZAF-Pur	Валент.	Атом. %	Кэф.	Текст
Al	K 794	10.15	18.48	99.90	1.0673	1.0003	3	0.000	0.000	
Si	K 2066	6.04	57.28	99.99	0.7648	1.0000	4	0.000	0.000	
K	K 195	8.62	0.00	0.00	0.0000	0.0000	1	0.000	0.000	
Ca	K 417	4.26	8.96	51.33	0.7458	0.9304	2	0.000	0.000	
Ca	L 0	213.36	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	
Fe	K 382	3.77	15.29	99.90	0.8017	1.0000	2	0.000	0.000	
Fe	L 2	43.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	

в)

Рисунок Е.2 – Загальний хімічний аналіз зразків порід а) вапняк;
б) гнейс; в) граніт

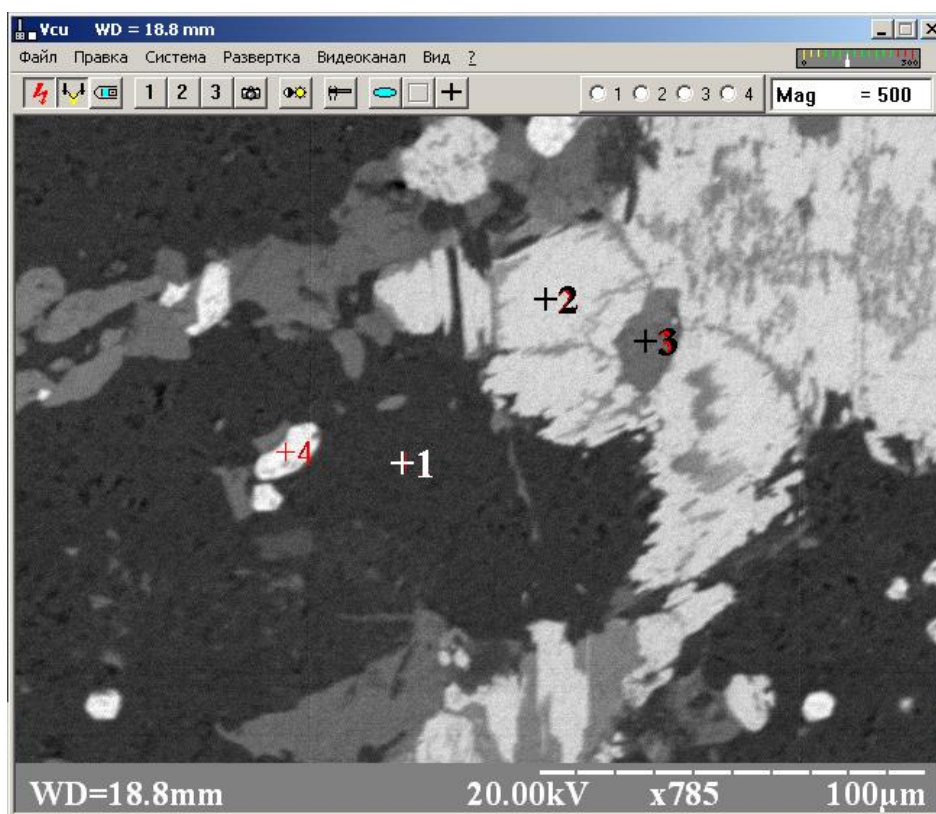


Рисунок Е.3 – Фото точек на зразку гнейсу, в яких проведено хімічний аналіз: +1 – точка №1; +2 – точка № 2; +3 – точка № 3; +4 – точка № 4

а)

Информация										
Напряжение (кВ): 20.00 Сумма %: 100.00										
Элемент	Инт.	Погр. %	С %	С-Pur %	ZAF	ZAF-Pur	Валент.	Атом. %	Козф.	Текст
Al K	20	78.27	0.88	99.90	1.0407	1.0003	3	0.000	0.000	
Si K	2257	4.45	85.93	99.99	1.0227	1.0000	4	0.000	0.000	
S K	71	32.08	6.34	13.74	0.3935	0.6165	6	0.000	0.000	
Ca K	36	17.80	1.57	51.33	0.6732	0.9304	2	0.000	0.000	
Ca L	0	173.94	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	
Fe K	70	9.48	5.28	99.90	0.7803	1.0000	2	0.000	0.000	
Fe L	0	92.95	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	

б)

Информация										
Напряжение (кВ): 20.00 Сумма %: 100.00										
Элемент	Инт.	Погр. %	С %	С-Pur %	ZAF	ZAF-Pur	Валент.	Атом. %	Козф.	Текст
Al K	4	267.69	0.04	99.90	1.6652	1.0003	3	0.000	0.000	
Si K	283	11.44	2.37	99.99	1.7238	1.0000	4	0.000	0.000	
S K	3828	2.85	47.80	13.74	1.0420	0.6165	6	0.000	0.000	
Ca K	8	106.45	0.11	51.33	0.8067	0.9304	2	0.000	0.000	
Ca L	1	234.62	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	
Fe K	1976	3.64	49.68	99.90	0.8677	1.0000	2	0.000	0.000	
Fe L	3	87.31	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	

в)

Информация										
Напряжение (кВ): 20.00 Сумма %: 100.00										
Элемент	Инт.	Погр. %	С %	С-Pur %	ZAF	ZAF-Pur	Валент.	Атом. %	Козф.	Текст
Mg K	104	14.84	5.64	60.31	1.2465	0.6675	2	0.000	0.000	
Al K	150	12.17	5.07	99.90	1.0587	1.0003	3	0.000	0.000	
Si K	1026	4.03	31.31	99.99	1.0012	1.0000	4	0.000	0.000	
S K	137	13.24	5.92	13.74	0.6377	0.6165	6	0.000	0.000	
Ca K	524	4.58	14.15	51.33	0.8548	0.9304	2	0.000	0.000	
Ca L	0	236.57	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	
Fe K	690	3.94	37.90	99.90	0.8416	1.0000	2	0.000	0.000	
Fe L	0	514.50	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	

г)

Информация										
Напряжение (кВ): 20.00 Сумма %: 100.00										
Элемент	Инт.	Погр. %	С %	С-Pur %	ZAF	ZAF-Pur	Валент.	Атом. %	Козф.	Текст
Mg K	2	372.69	0.05	60.31	1.6567	0.6675	2	0.000	0.000	
Al K	17	65.33	0.22	99.90	1.5823	1.0003	3	0.000	0.000	
Si K	330	7.87	3.62	99.99	1.5628	1.0000	4	0.000	0.000	
S K	2205	2.79	32.66	13.74	1.0436	0.6165	6	0.000	0.000	
Ca K	37	24.15	0.53	51.33	0.8960	0.9304	2	0.000	0.000	
Ca L	-1	107.09	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	
Fe K	2184	2.98	62.93	99.90	0.8994	1.0000	2	0.000	0.000	
Fe L	-1	114.64	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	

Рисунок Е.4 – Результаты программной обработки данных химического анализа
зразку гнейсу: а) – у точці №1, б) – у точці №2, в) – у точці №3, г) – у точці –
№4

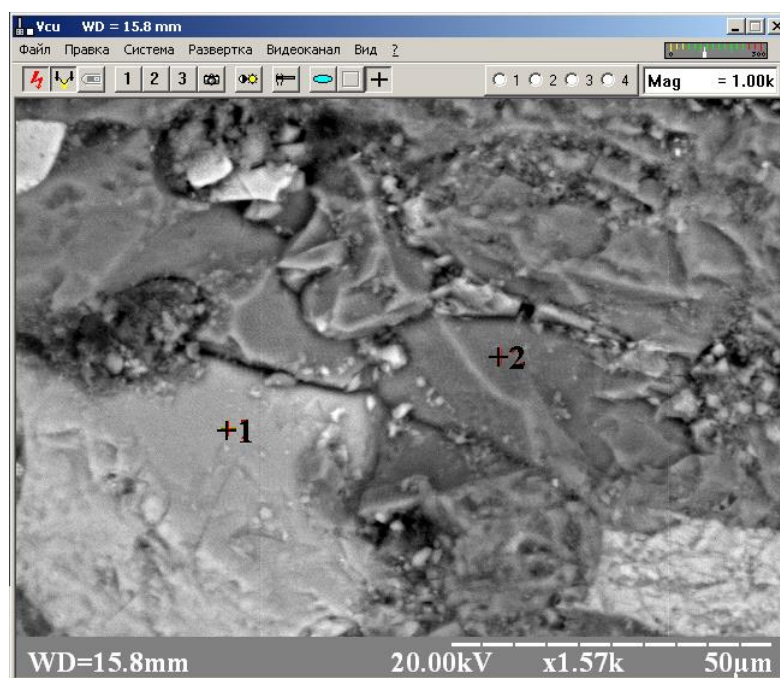


Рисунок Е.5 – Фото точок на зразку граніту в яких проведено хімічний аналіз: +1 – точка №1; +2 – точка № 2

Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	Погр. %	C %	C-Pur %	ZAF	ZAF-Pur	Валент.	Атом. %	Козф.	Текст
Mg	K 82	19.68	2.59	60.31	1.2867	0.6675	2	0.000	0.000	
Al	K 654	5.78	12.01	99.90	1.1743	1.0003	3	0.000	0.000	
Si	K 1360	3.98	26.73	99.99	0.9367	1.0000	4	0.000	0.000	
K	K 1230	5.05	0.00	0.00	0.0000	0.0000	1	0.000	0.000	
Ca	K 96	24.45	1.44	51.33	0.9283	0.9304	2	0.000	0.000	
Ca	L 0	1157.42	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	
Ti	K 215	13.14	4.03	99.90	0.9273	1.0000	4	0.000	0.000	
Ti	L -1	791.58	0.00	0.00	0.0000	0.0000	4	0.000	0.000	
Fe	K 1686	2.60	53.20	99.90	0.8828	1.0000	2	0.000	0.000	
Fe	L -1	720.78	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	

а)

Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	Погр. %	C %	C-Pur %	ZAF	ZAF-Pur	Валент.	Атом. %	Козф.	Текст
Mg	K 25	61.66	0.97	60.31	0.9486	0.6675	2	0.000	0.000	
Al	K 948	6.84	18.83	99.90	0.9843	1.0003	3	0.000	0.000	
Si	K 2954	3.75	68.31	99.99	0.7217	1.0000	4	0.000	0.000	
Ca	K 505	4.27	9.10	51.33	0.6998	0.9304	2	0.000	0.000	
Ca	L 1	899.27	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	
Fe	K 86	8.31	2.79	99.90	0.7785	1.0000	2	0.000	0.000	
Fe	L 0	62819.86	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	

б)

Рисунок Е.6 – Результаты программной обработки данных химического анализа зразку граніту: а) – у точці № 1, б) – у точці № 2

Додаток Ж

Результати досліджень модуля пружності обраних гірських порід до та після гідрокавітаційної обробки з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку

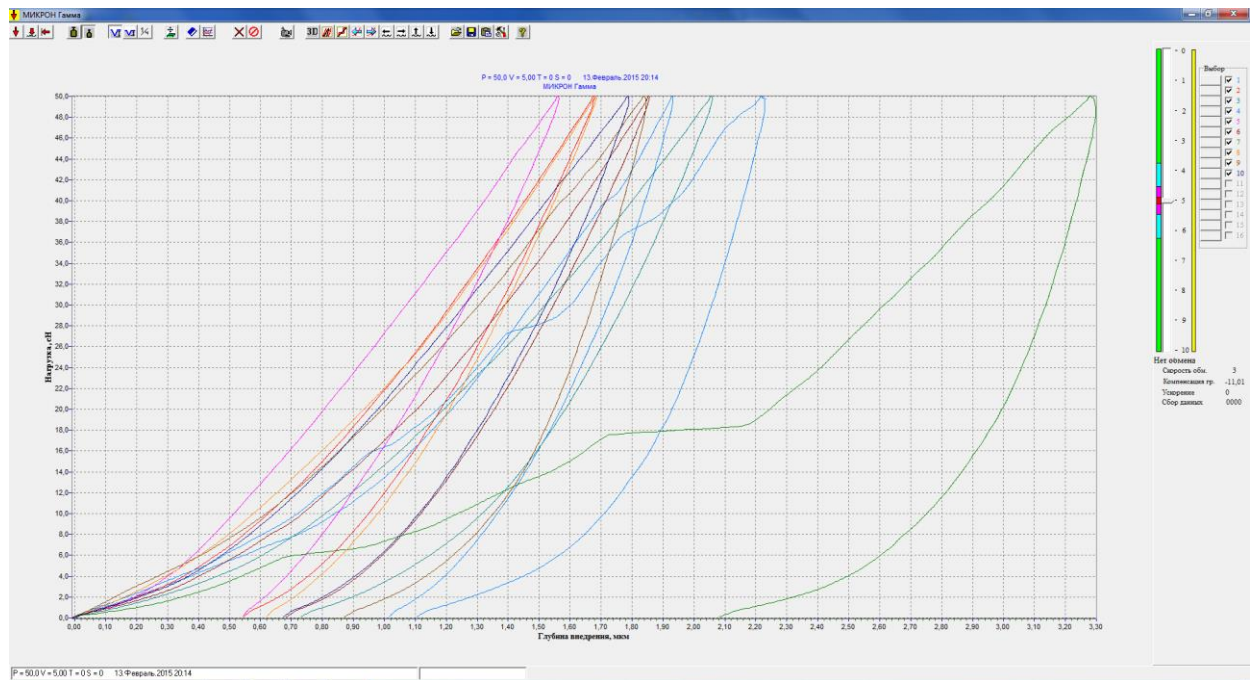


Рисунок Ж.1 – Діаграми навантаження граніту індентором Берковича після обробки гідрокавітаційним навантаженням

Таблица расчетов

P = 50.0 V = 5.00 T = 0 S = 0 13.Февраль.2015.2014

№	P, гр.	V, гр/с	T, с	h1, мкм	hc, мкм	h2, мкм	H(Маргел)	H(Мейер)	H(Мейер)	E, GPa	Ao6	Aup	s (пласт)	K, пласт	Напр. GPa
1	50.0	5.0	0	1,930	1,552	1,012	5,754	5,477	8,475	109.7	33.81	16.63	0.508	0.720	1,449
2	50.0	5.0	0	1,676	1,145	0,541	8,374	7,265	15,574	106.0	32.21	22.18	0.312	0.588	1,922
3	50.0	5.0	0	2,058	1,536	0,726	5,394	4,819	8,646	80.4	38.40	22.51	0.414	0.660	1,275
4	50.0	5.0	0	2,230	1,919	1,099	5,101	4,104	5,544	107.9	46.22	16.65	0.640	0.832	1,086
5	50.0	5.0	0	1,561	1,026	0,539	10,454	8,371	19,377	117.4	32.51	21.44	0.340	0.589	2,215
6	50.0	5.0	0	1,854	1,299	0,679	6,538	5,934	12,091	89.3	34.07	22.48	0.340	0.592	1,570
7	50.0	5.0	0	3,296	2,980	2,078	1,974	1,879	2,299	68.5	57.72	16.55	0.713	0.863	0,497
8	50.0	5.0	0	1,683	1,141	0,617	8,530	7,209	15,679	104.3	33.19	21.34	0.357	0.592	1,908
9	50.0	5.0	0	1,843	1,517	0,867	7,350	6,009	8,868	130.3	37.59	14.95	0.602	0.783	1,590
10	50.0	5.0	0	1,788	1,320	0,671	7,638	6,387	11,721	104.4	35.64	20.36	0.429	0.672	1,690
D				0,472	0,539	0,437	2,215	1,745	4,861	17,056	7,629	2,807	0.135	0.100	
M				1,992	1,544	0,883	6,711	5,745	10,827	101,820	38,136	19,509	0,466	0,689	

Отступ % 10 dP % 10 Расчет Закроить Печать Форма Редактор

Рисунок Ж.2 – Результати програмної обробки діаграм навантаження граніту після обробки гідрокавітаційним навантаженням

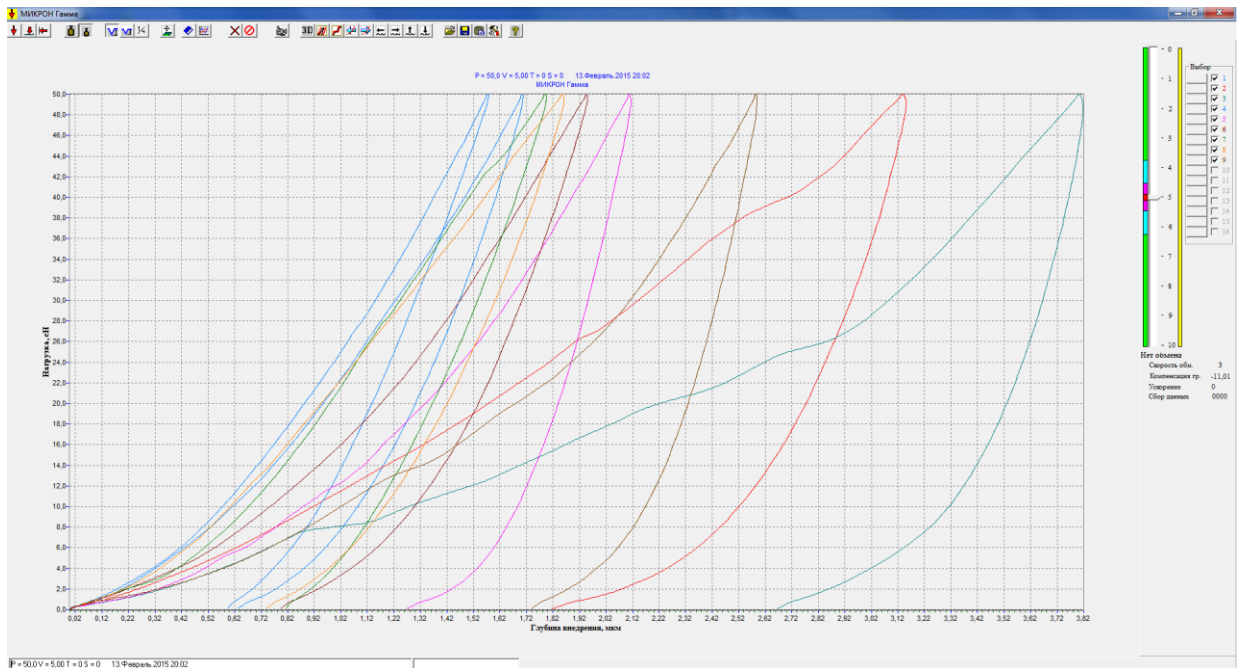


Рисунок Ж.3 – Діаграми навантаження граніту індентором Берковича після обробки гідрокавітаційним навантаженням з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку

Таблица расчетов

P = 50.0 V = 5.00 T = 0 S = 0 13.02.2015 20:02

Nº	P, гр.	V, гр/с	T, с.	h1, мкм	hc, мкм	h2, мкм	H(Мартен)	H(Мейер)	H(Мейер)	E, ГПа	Aоб	Aуп	s (пласт)	K пласт	Напр. ГПа
1	50.0	5.0	0	1,705	1,291	0,626	8,213	7,020	12,245	120,6	33,26	18,69	0,438	0,689	1,857
2	50.0	5.0	0	3,149	2,781	1,813	2,642	2,058	2,639	62,9	67,42	19,11	0,717	0,863	0,544
3	50.0	5.0	0	3,815	3,515	2,661	1,536	1,402	1,652	61,1	69,70	15,57	0,777	0,892	0,371
4	50.0	5.0	0	1,575	1,068	0,590	9,540	8,228	17,908	119,0	30,45	19,59	0,357	0,583	2,177
5	50.0	5.0	0	2,111	1,810	1,264	4,675	4,578	6,230	118,2	35,94	13,09	0,636	0,790	1,211
6	50.0	5.0	0	1,948	1,512	0,788	5,910	5,378	8,925	97,8	35,70	19,67	0,449	0,695	1,423
7	50.0	5.0	0	1,793	1,334	0,808	7,611	6,351	11,474	105,3	35,82	19,20	0,464	0,680	1,680
8	50.0	5.0	0	1,859	1,401	0,735	7,477	5,905	10,396	100,5	39,25	20,19	0,486	0,708	1,562
9	50.0	5.0	0	2,587	2,308	1,735	3,046	3,050	3,831	100,1	43,08	12,83	0,702	0,838	0,807
D				0,714	0,770	0,670	2,638	2,179	4,980	21,124	13,860	2,752	0,142	0,096	
M				2,282	1,891	1,224	5,628	4,886	8,367	98,389	43,402	17,549	0,558	0,749	

Отступ % 10 dP % 10 Расчет Закрыть Печать Форма Редактор

Рисунок Ж.4 – Результати програмної обробки діаграм навантаження граніту після обробки гідрокавітаційним навантаженням з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку

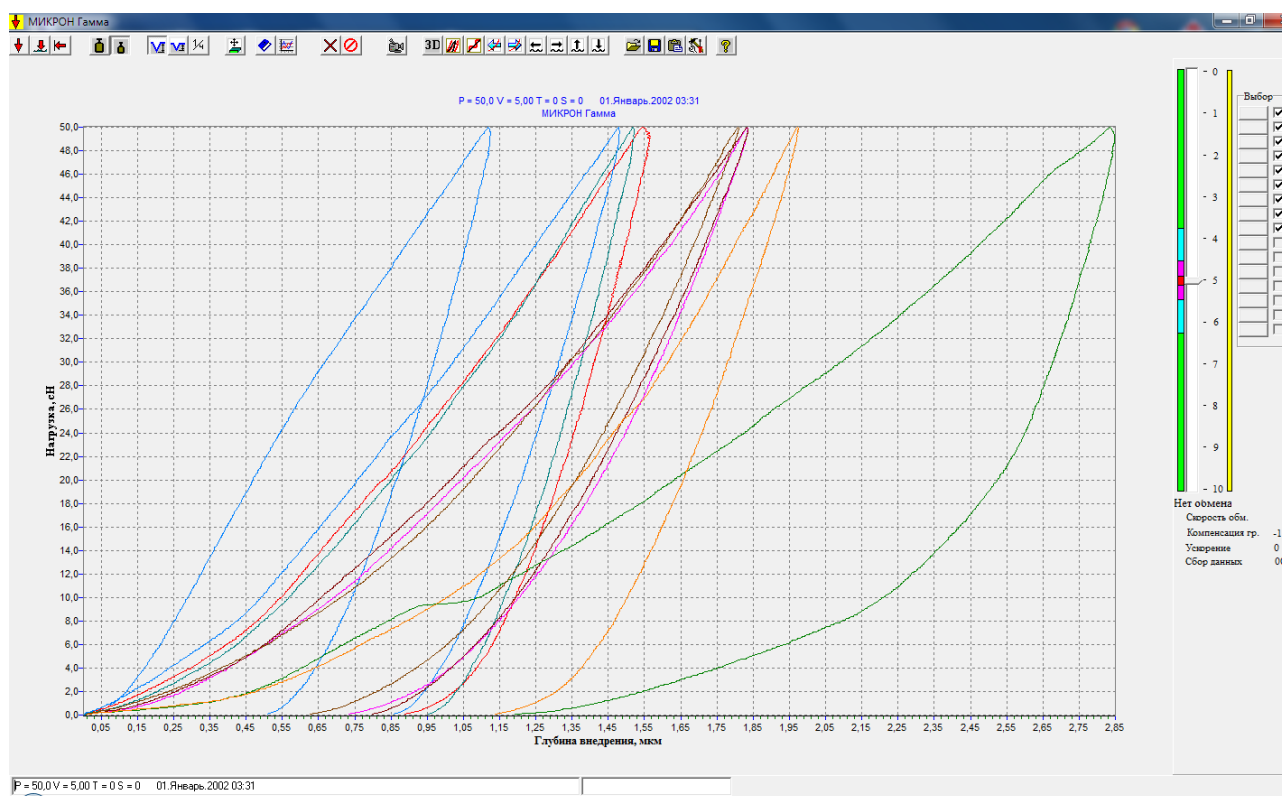


Рисунок Ж.5 – Діаграми навантаження гнейсу індентором Берковича до гідрокавітаційного навантаження

Таблица расчетов

P = 50.0 V = 5.00 T = 0 S = 0 01.Январь.2002 03:31

№	P, гр.	V, гр/с	T, с.	h1, мкм	hc, мкм	h2, мкм	H(Мартел)	H(Мейер)	H(Мейер)	E, GPa	Aоб	Aуп	s (пласт)	K пласт	Напр. GPa
1	50,0	5,0	0	1,120	0,830	0,503	23,283	16,256	29,602	267,6	26,76	13,24	0,505	0,729	4,301
2	50,0	5,0	0	1,562	1,269	0,881	9,961	8,362	12,682	173,0	31,03	21,27	0,315	0,763	2,212
3	50,0	5,0	0	1,517	1,246	0,945	10,227	8,866	13,140	190,9	29,18	13,09	0,552	0,768	2,346
4	50,0	5,0	0	1,477	1,168	0,852	11,792	9,361	14,950	179,0	31,01	14,14	0,544	0,752	2,477
5	50,0	5,0	0	1,831	1,394	0,728	6,834	6,086	10,498	105,8	34,29	19,74	0,424	0,681	1,610
6	50,0	5,0	0	1,831	1,358	0,791	7,048	6,086	11,069	100,3	35,36	20,01	0,434	0,665	1,610
7	50,0	5,0	0	2,843	2,533	1,185	2,860	2,525	3,180	82,2	53,70	21,26	0,604	0,856	0,668
8	50,0	5,0	0	1,969	1,604	1,131	4,660	5,262	7,936	109,9	29,08	15,75	0,458	0,686	1,392
9	50,0	5,0	0	1,806	1,331	0,619	6,883	6,257	11,522	101,9	33,12	21,23	0,359	0,641	1,656
D				0,449	0,441	0,209	5,608	3,617	6,775	57,390	7,511	3,415	0,089	0,063	
M				1,773	1,415	0,848	9,283	7,673	12,731	145,622	33,726	17,748	0,466	0,727	
%				25,3	31,2	24,7	60,4	47,1	53,2	39,4	22,3	19,2	19,1	8,6	

Отступ % 10 dP % 10 Расчет Закрыть Печать Форма Редактор

Рисунок Ж.6 – Результати програмної обробки діаграм навантаження гнейсу до гідрокавітаційного навантаження

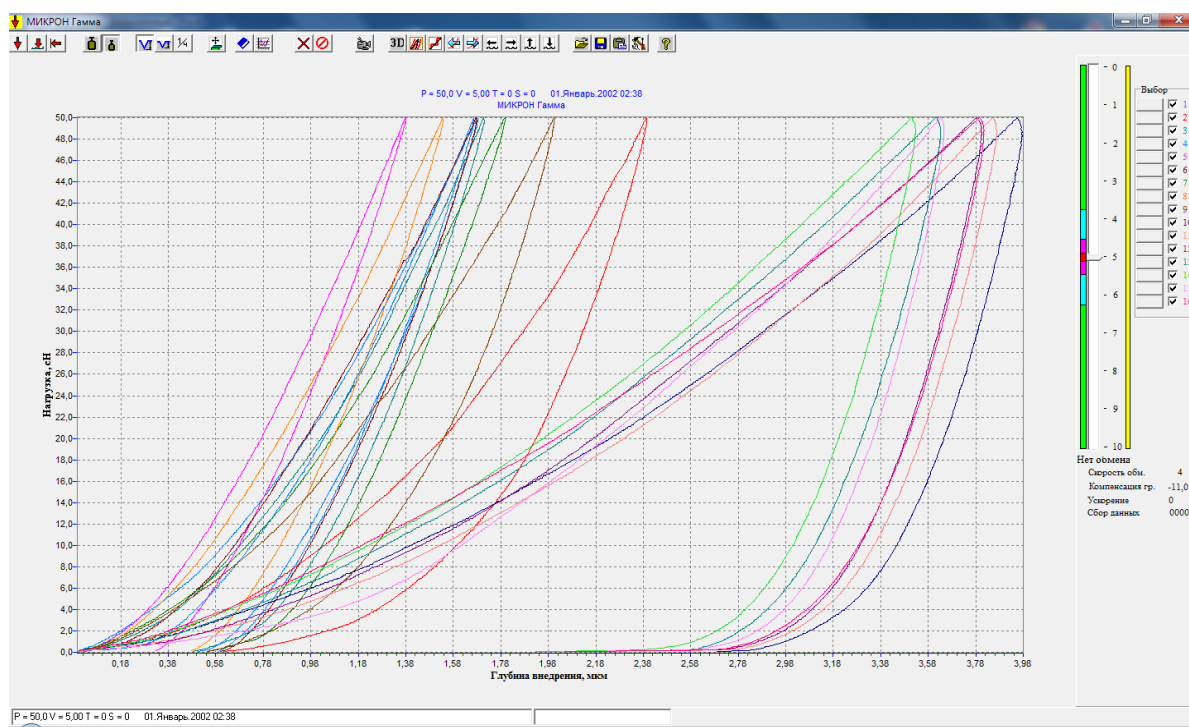


Рисунок Ж.7 – Діаграми навантаження вапняку індентором Берковича до гідрокавітаційного навантаження

Таблица расчетов

P = 50.0 V = 5.00 T = 0 S = 0 01.Январь.2002 02:44

№	P, гр.	V, гр/с	T, с.	h1,mkm	hс,mkm	h2,mkm	H(Мартел)	Hн(Мейер)	H(Мейер)	E, GPa	Aoб	Aуп	s (пласт)	K пласт	Напр. GP
1	50,0	5,0	0	3,976	3,604	2,687	1,491	1,291	1,571	48,2	76,52	20,89	0,727	0,879	0,342
2	50,0	5,0	0	3,867	3,510	2,098	1,477	1,365	1,656	51,4	69,79	17,57	0,748	0,872	0,361
3	50,0	5,0	0	3,804	3,458	2,025	1,601	1,411	1,707	53,9	71,96	18,50	0,743	0,880	0,373
4	50,0	5,0	0	3,631	3,276	2,010	1,792	1,548	1,902	55,4	70,05	17,69	0,747	0,873	0,410
5	50,0	5,0	0	3,525	3,167	1,924	1,924	1,642	2,035	56,8	68,85	17,16	0,751	0,870	0,435
6	50,0	5,0	0	3,645	3,343	2,024	1,576	1,536	1,826	63,9	62,35	16,02	0,743	0,879	0,406
7	50,0	5,0	0	3,814	3,456	2,043	1,719	1,403	1,709	52,0	77,95	18,10	0,768	0,885	0,371
8	50,0	5,0	0	4,054	3,719	1,884	1,311	1,242	1,475	51,8	71,37	17,75	0,751	0,883	0,329
9	50,0	5,0	0	4,175	3,799	2,089	1,214	1,171	1,414	45,1	72,18	17,27	0,761	0,870	0,310
10	50,0	5,0	0	3,800	3,466	2,020	1,607	1,413	1,699	55,6	72,06	17,60	0,756	0,884	0,374
11	50,0	5,0	0	3,952	3,564	2,086	1,531	1,306	1,607	46,5	77,21	18,18	0,765	0,874	0,346
12	50,0	5,0	0	4,526	4,175	2,137	1,063	0,996	1,171	44,0	80,52	18,30	0,773	0,891	0,264
13	50,0	5,0	0	3,859	3,515	2,044	1,525	1,370	1,652	53,3	71,60	17,69	0,753	0,880	0,363
14	50,0	5,0	0	3,833	3,465	2,058	1,561	1,389	1,700	50,6	71,82	17,70	0,754	0,872	0,368
15	50,0	5,0	0	4,404	4,075	2,202	0,997	1,052	1,229	48,0	69,58	16,89	0,757	0,882	0,278
16	50,0	5,0	0	3,731	3,370	2,111	1,710	1,466	1,797	52,9	72,56	16,91	0,767	0,875	0,388
D				0,261	0,261	0,171	0,244	0,167	0,220	4,806	4,130	1,003	0,011	0,006	
M				3,912	3,560	2,090	1,506	1,350	1,634	51,837	72,273	17,764	0,754	0,878	
%				6,7	7,3	8,2	16,2	12,4	13,5	9,3	5,7	5,6	1,5	0,7	

Отступ % 10 dP % 10 Расчет Закреть Печать Форма Редактор

Рисунок Ж.8 – Результати програмної обробки діаграм навантаження вапняку до гідрокавітаційного навантаження

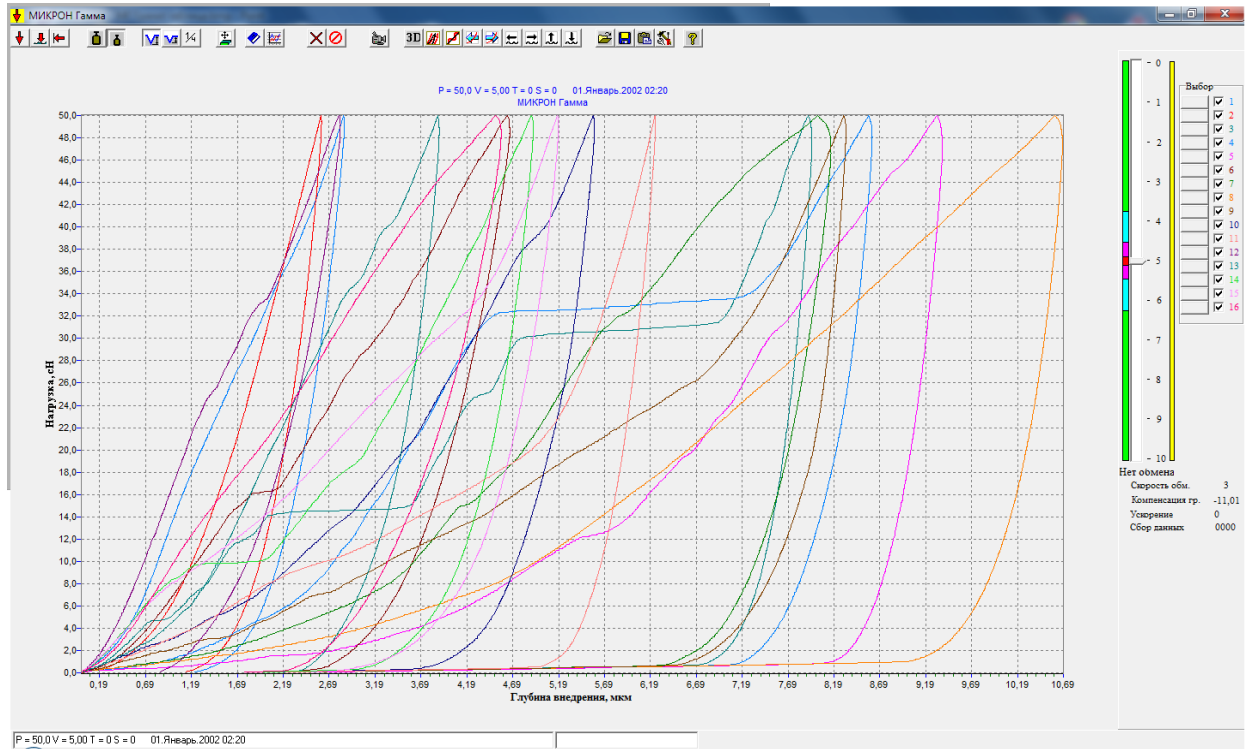


Таблица расчетов

P = 50,0 V = 5,00 T = 0 S = 0 01.Январь.2002 02:20

Nº	P, гр.	V, гр/с	T, с.	h1,mkm	hc,mkm	h2,mkm	H(Мартел)	H(Мейер)	H(Мейер)	E, GPa	Ao6	Aup	s (пласт)	K пласт	Напр. GF
1	50,0	5,0	0	2,856	2,400	1,216	3,310	2,503	3,543	59,0	62,97	22,37	0,645	0,819	0,662
2	50,0	5,0	0	2,606	2,190	1,122	3,003	3,005	4,255	70,7	43,43	21,82	0,498	0,760	0,795
3	50,0	5,0	0	7,951	7,640	2,214	0,409	0,323	0,350	27,2	168,15	22,66	0,865	0,954	0,085
4	50,0	5,0	0	8,607	8,211	2,456	0,366	0,275	0,303	19,8	190,77	24,91	0,869	0,948	0,073
5	50,0	5,0	0	9,371	8,997	2,658	0,195	0,232	0,252	19,2	131,38	23,63	0,820	0,929	0,061
6	50,0	5,0	0	4,658	3,965	1,861	1,206	0,941	1,298	23,5	99,55	33,00	0,668	0,826	0,249
7	50,0	5,0	0	8,157	7,618	2,322	0,334	0,307	0,352	15,7	148,16	32,51	0,781	0,909	0,081
8	50,0	5,0	0	10,680	10,298	2,307	0,182	0,179	0,192	16,4	181,17	29,33	0,838	0,947	0,047
9	50,0	5,0	0	8,321	7,974	2,362	0,280	0,295	0,321	23,3	131,93	25,21	0,809	0,934	0,078
10	50,0	5,0	0	5,582	5,128	2,157	0,682	0,655	0,776	27,7	96,99	26,05	0,731	0,883	0,173
11	50,0	5,0	0	6,244	5,902	2,200	0,443	0,523	0,586	31,9	88,08	19,16	0,783	0,903	0,138
12	50,0	5,0	0	2,811	2,193	0,843	3,664	2,582	4,243	47,5	66,52	30,25	0,545	0,768	0,683
13	50,0	5,0	0	3,890	3,473	2,082	1,602	1,348	1,692	44,5	77,05	22,44	0,709	0,865	0,357
14	50,0	5,0	0	4,913	4,487	1,965	0,951	0,845	1,014	33,7	92,16	25,33	0,725	0,884	0,224
15	50,0	5,0	0	5,188	4,701	2,491	0,928	0,758	0,923	28,2	105,83	28,09	0,735	0,885	0,201
16	50,0	5,0	0	4,564	3,802	1,756	1,427	0,980	1,412	22,3	110,81	38,21	0,655	0,828	0,259
D				2,448	2,507	0,508	1,116	0,886	1,361	15,301	41,835	4,861	0,104	0,060	
M				6,025	5,561	2,001	1,186	0,984	1,344	31,912	112,184	26,561	0,730	0,878	
%				40,6	45,1	25,4	94,1	90,0	101,3	47,9	37,3	18,3	14,3	6,8	

Отступ % 10 dP % 10 Расчет Закреть Печать Форма Редактор

Рисунок Ж.10 – Результати програмної обробки діаграм навантаження пісковику до гідрокавітаційного навантаження

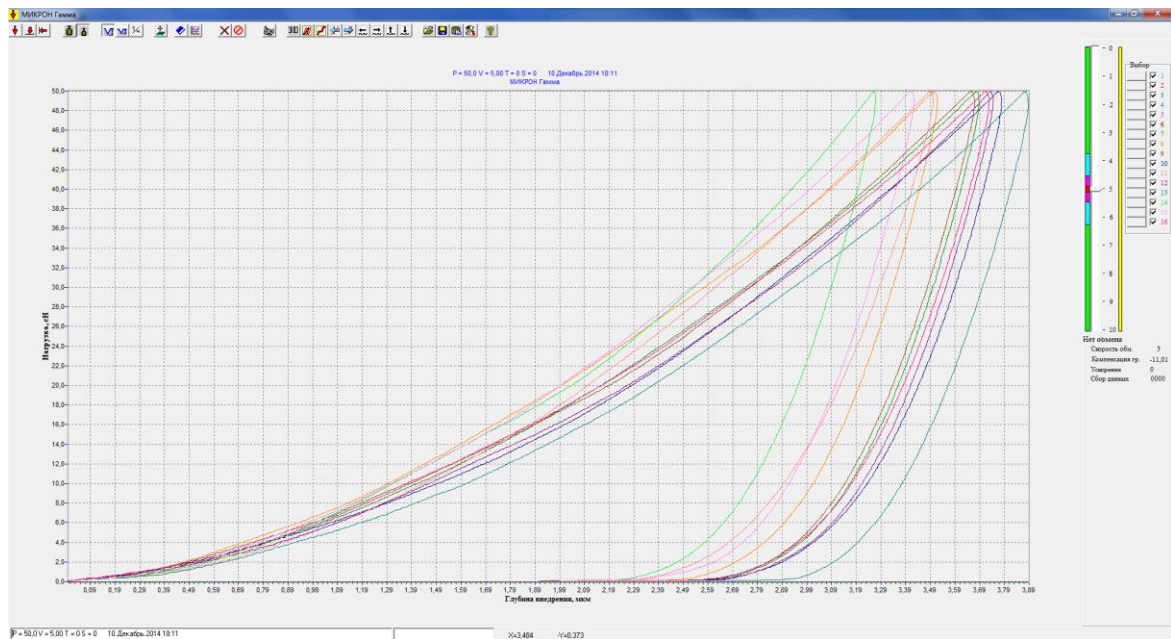


Рисунок Ж.11 – Діаграми навантаження вапняку індентором Берковича після гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку

Таблица расчетов

P = 50.0 V = 5.00 T = 0 S = 0 10. Декабрь. 2014 18:11

N°	P, гр.	V, гр/с	T, с	h1, мкм	hс, мкм	h2, мкм	H(Мартел)	H(Мейер)	H(Мейер)	E, GPa	Aоб	Aуп	ε (пласт)	K, пласт	Натр. GPa
1	50.0	5.0	0	3.502	3.101	2.144	1.773	1.664	2.122	51.9	62.22	19.68	0.684	0.839	0.440
2	50.0	5.0	0	3.744	3.350	2.279	1.559	1.456	1.819	48.8	66.82	17.35	0.740	0.852	0.385
3	50.0	5.0	0	3.887	3.511	2.248	1.425	1.351	1.656	48.8	68.37	16.52	0.758	0.863	0.357
4	50.0	5.0	0	3.269	2.933	2.002	1.975	1.910	2.372	65.4	56.39	15.96	0.717	0.851	0.505
5	50.0	5.0	0	3.425	3.066	1.955	1.927	1.740	2.171	58.6	63.24	16.52	0.739	0.858	0.460
6	50.0	5.0	0	3.728	3.353	2.060	1.641	1.468	1.815	51.3	69.49	18.78	0.730	0.865	0.388
7	50.0	5.0	0	3.688	3.323	2.132	1.655	1.500	1.848	53.1	67.86	17.64	0.740	0.865	0.397
8	50.0	5.0	0	3.519	3.160	1.982	1.870	1.648	2.044	56.9	66.56	16.77	0.748	0.865	0.436
9	50.0	5.0	0	3.668	3.306	1.906	1.668	1.517	1.867	53.9	67.26	16.87	0.749	0.865	0.401
10	50.0	5.0	0	3.779	3.412	2.069	1.547	1.429	1.753	51.5	68.18	17.74	0.740	0.866	0.378
11	50.0	5.0	0	3.502	3.101	2.144	1.773	1.664	2.122	51.9	62.22	19.68	0.684	0.839	0.440
12	50.0	5.0	0	3.744	3.350	2.279	1.559	1.456	1.819	48.8	66.82	17.35	0.740	0.852	0.385
13	50.0	5.0	0	3.887	3.511	2.248	1.425	1.351	1.656	48.8	68.37	16.52	0.758	0.863	0.357
14	50.0	5.0	0	3.269	2.933	2.002	1.975	1.910	2.372	65.4	56.39	15.96	0.717	0.851	0.505
15	50.0	5.0	0	3.425	3.066	1.955	1.927	1.740	2.171	58.6	63.24	16.52	0.739	0.858	0.460
16	50.0	5.0	0	3.728	3.353	2.060	1.641	1.468	1.815	51.3	69.49	18.78	0.730	0.865	0.388
D				0.192	0.182	0.120	0.180	0.173	0.226	5.299	4.069	1.181	0.021	0.009	
M				3.610	3.239	2.092	1.709	1.580	1.964	54.062	65.182	17.415	0.732	0.857	

Отступ % 10 dP % 10 Расчет Закрыть Печать Форма Редактор

Рисунок Ж.12 – Результати програмної обробки діаграми навантаження вапняку після гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку

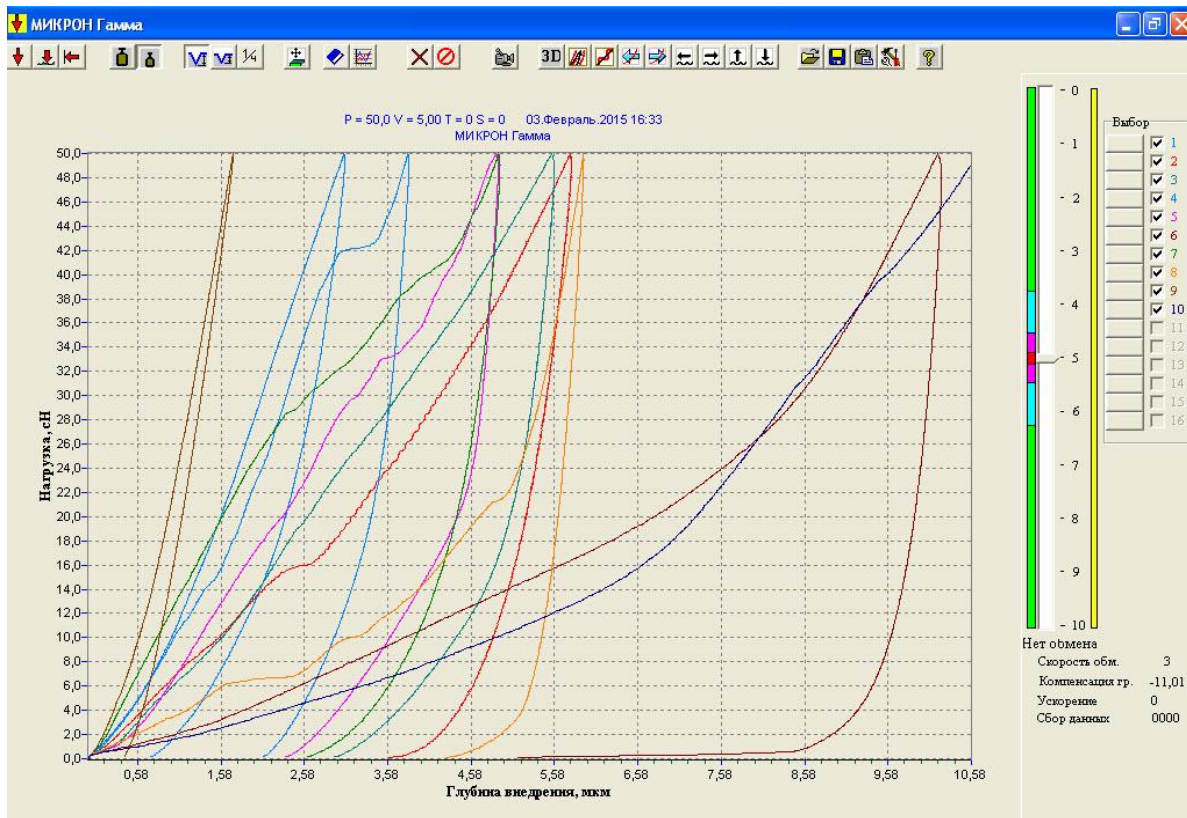


Рисунок Ж.13 – Діаграми навантаження пісковику індентором Берковича після гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку

Таблица расчетов

P = 50,0 V = 5,00 T = 0 S = 0 03.Февраль.2015 16:33

N°	P, гр.	V, гр/с	T, с	h1, мкм	hс, мкм	h2, мкм	H(Мартел)	Hн(Мейер)	H(Мейер)	E, GPa	Aoб	Aуп	s (пласт)	K пласт	Напр. GPa
1	50,0	5,0	0	3,069	2,402	0,720	2,752	2,168	3,538	40,2	64,96	36,55	0,437	0,743	0,574
2	50,0	5,0	0	5,788	5,192	3,578	0,753	0,609	0,757	20,8	119,33	86,72	0,273	0,875	0,161
3	50,0	5,0	0	5,583	5,114	2,926	0,864	0,655	0,780	26,9	122,76	53,04	0,568	0,904	0,173
4	50,0	5,0	0	3,837	3,439	2,073	1,926	1,386	1,725	47,1	88,89	26,88	0,698	0,888	0,367
5	50,0	5,0	0	4,907	4,577	2,335	1,107	0,848	0,974	42,7	106,82	34,93	0,673	0,923	0,224
6	50,0	5,0	0	10,223	9,905	5,130	0,194	0,195	0,208	20,4	169,41	23,09	0,864	0,953	0,052
7	50,0	5,0	0	4,928	4,470	2,607	1,326	0,841	1,021	31,5	129,59	32,49	0,749	0,912	0,222
8	50,0	5,0	0	5,932	5,627	4,262	0,442	0,580	0,645	37,6	75,32	16,79	0,777	0,899	0,153
9	50,0	5,0	0	1,729	1,025	0,416	8,192	6,831	19,425	89,4	34,56	27,08	0,217	0,491	1,807
10	49,0	5,0	0	10,569		10,569	0,175	0,179			169,26	0,00	1,000	NAN	
D				2,676		2,738	2,270								
M				5,657		3,462	1,773								
%				47,3		79,1	128,0								

Отступ % 10 dP % 10 Расчет Закреть Печать Форма Редактор

Рисунок Ж.14 – Результати програмної обробки діаграм навантаження пісковику після гідрокавітаційного навантаження з магнітно-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку

Додаток К

Пристрій для виміру швидкості ультразвукових хвиль УИСУ-01

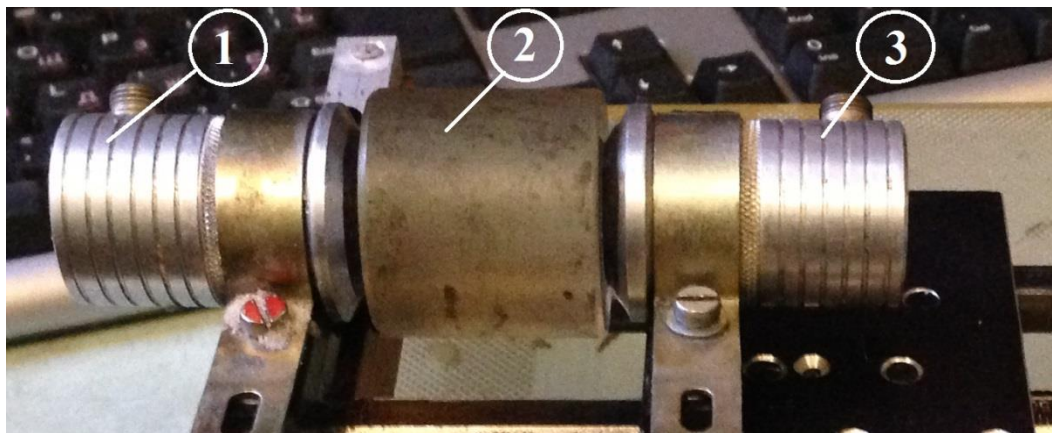


Рисунок К.1 – Пристрій для виміру швидкості ультразвукових хвиль УИСУ-01 (1 – випромінювач, 2 – зразок, 3 – приймач)

Додаток Л

**Лістинг програми MathCAD з методикою визначення коефіцієнтів
рівняння регресії**

$$X := \begin{pmatrix} 1 & 0.015 & 0.1 & 0.0015 & 0.000225 & 0.01 \\ 1 & 0.015 & 0.3 & 0.0045 & 0.000225 & 0.09 \\ 1 & 0.015 & 0.5 & 0.0075 & 0.000225 & 0.25 \\ 1 & 0.030 & 0.1 & 0.003 & 0.0009 & 0.01 \\ 1 & 0.030 & 0.3 & 0.009 & 0.0009 & 0.09 \\ 1 & 0.030 & 0.5 & 0.015 & 0.0009 & 0.25 \\ 1 & 0.045 & 0.1 & 0.0045 & 0.002025 & 0.01 \\ 1 & 0.045 & 0.3 & 0.0135 & 0.002025 & 0.09 \\ 1 & 0.045 & 0.5 & 0.0225 & 0.002025 & 0.25 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 50.79 \\ 48.71 \\ 50.99 \\ 64.06 \\ 61.01 \\ 63.45 \\ 56.43 \\ 53.28 \\ 55.94 \end{pmatrix}$$

$$X0 := X^T$$

$$X0 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.015 & 0.015 & 0.015 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.045 & 0.045 & 0.045 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.3 & 0.5 \\ 1.5 \times 10^{-3} & 4.5 \times 10^{-3} & 7.5 \times 10^{-3} & 3 \times 10^{-3} & 9 \times 10^{-3} & 0.015 & 4.5 \times 10^{-3} & 0.014 & 0.023 \\ 2.25 \times 10^{-4} & 2.25 \times 10^{-4} & 2.25 \times 10^{-4} & 9 \times 10^{-4} & 9 \times 10^{-4} & 9 \times 10^{-4} & 2.025 \times 10^{-3} & 2.025 \times 10^{-3} & 2.025 \times 10^{-3} \\ 0.01 & 0.09 & 0.25 & 0.01 & 0.09 & 0.25 & 0.01 & 0.09 & 0.25 \end{pmatrix}$$

$$X0 \cdot X = \begin{pmatrix} 9 & 0.27 & 2.7 & 0.081 & 9.45 \times 10^{-3} & 1.05 \\ 0.27 & 9.45 \times 10^{-3} & 0.081 & 2.835 \times 10^{-3} & 3.645 \times 10^{-4} & 0.032 \\ 2.7 & 0.081 & 1.05 & 0.032 & 2.835 \times 10^{-3} & 0.459 \\ 0.081 & 2.835 \times 10^{-3} & 0.032 & 1.103 \times 10^{-3} & 1.093 \times 10^{-4} & 0.014 \\ 9.45 \times 10^{-3} & 3.645 \times 10^{-4} & 2.835 \times 10^{-3} & 1.093 \times 10^{-4} & 1.488 \times 10^{-5} & 1.103 \times 10^{-3} \\ 1.05 & 0.032 & 0.459 & 0.014 & 1.103 \times 10^{-3} & 0.212 \end{pmatrix}$$

$$X0 \cdot Y = \begin{pmatrix} 504.66 \\ 15.367 \\ 151.218 \\ 4.603 \\ 0.539 \\ 58.978 \end{pmatrix}$$

$$(X0 \cdot X)^{-1} = \begin{pmatrix} 10.212 & -541.667 & -20.625 & 250 & 7.407 \times 10^3 & 19.792 \\ -541.667 & 3.88 \times 10^4 & 250 & -8.333 \times 10^3 & -5.926 \times 10^5 & -2.604 \times 10^{-11} \\ -20.625 & 250 & 141.667 & -833.333 & -1.245 \times 10^{-10} & -187.5 \\ 250 & -8.333 \times 10^3 & -833.333 & 2.778 \times 10^4 & -5.213 \times 10^{-9} & 7.575 \times 10^{-11} \\ 7.407 \times 10^3 & -5.926 \times 10^5 & 2.677 \times 10^{-11} & -8.923 \times 10^{-10} & 9.877 \times 10^6 & 8.224 \times 10^{-12} \\ 19.792 & -5.479 \times 10^{-11} & -187.5 & 7.228 \times 10^{-11} & 5.147 \times 10^{-10} & 312.5 \end{pmatrix}$$

$$(X0 \cdot X)^{-1} \cdot (X0 \cdot Y) = \begin{pmatrix} 21.027 \\ 2.892 \times 10^3 \\ -38.175 \\ -57.5 \\ -4.511 \times 10^4 \\ 65.25 \end{pmatrix}$$

Додаток М

Акт впровадження на Товкачівському гірничозбагачувальному комбінаті



АКТ

«12» грудня 2014 р.

м. Овруч

впровадження результатів дисертаційного дослідження Стрельцової Інни Миколаївни на тему: «Керування питомою поверхневою енергією руйнування гірських порід механіко-гідрокавітаційним навантаженням».

Комісія у складі:

від ПрАТ «Товкачівський» генеральний директор Савчук В. П. (голова комісії), головний інженер Бирковський М. О.;

від Національного технічного університету України «КПІ» ІЄЕ д. т. н., проф. Терентьев О. М., аспірант Стрельцова І. М.

цим актом засвідчує, що запропонований в дисертаційному дослідженні Стрельцової І. М. спосіб зниження енергоємності руйнування гірських порід за рахунок ослаблення молекулярних зв'язків під дією субрезонансних явищ використано для впровадження нової технології та обладнання руйнування гірських порід комбінованим механіко-гідрокавітаційним навантаженням.

Суть технології полягає у зменшенні опору різання порід. Це здійснюється шляхом внесення штучної та ініціюванні зростання природної тріщинуватості прещесуючим кавітаційним потоком промивної рідини. На основі наукових положень, висновків та рекомендацій дисертації Стрельцової І. М. розроблено та впроваджено систему енергоощадного руйнування гірських порід механіко-гідрокавітаційним навантаженням.

При впровадженні результатів дослідження досягнуто технічний ефект, по зниженню енергоємності руйнування до 10 %.

Річний економічний ефект від впровадження механіко-гідрокавітаційного способу руйнування гірських порід досягає близько 22000 грн. Економічний ефект буде уточнюватись протягом трьох наступних років, починаючи з 2015.

Даний акт складено у 2 примірниках.

Цей акт не є підставою щодо взаємних фінансових розрахунків.

Голова комісії:

Савчук О.П.

Члени комісії:

(підпис)

Бирковський М.О.

(підпис)

Терентьев О. М.

(підпис)

Стрельцова І. М.

(підпис)

Додаток Н
Сертифікати та дипломи участі у конференціях та конкурсах за
темою дисертації



Teoretičeskaâ i prikladnaâ nauka

Theoretical & Applied Science

CERTIFICATE

This is to confirm that

Стрельцова

Инна Николаевна

*participated in International Scientific
Practical Conference*

“ The results of scientific research in 2013 ”

30.12.2013

Neoplanta, Serbia



Prof. Vladimir N. Kestelman
Prof. Arne Jönsson
Prof. Sagat Zhunisbekov
Alexandr N. Shevtsov

www.T-Science.org

Teoretičeskaâ i prikladnaâ nauka

Theoretical & Applied Science

CERTIFICATE

This is to confirm that

Стрельцова

Инна Николаевна

*participated in International Scientific
Practical Conference*

“ Scientific technologies of the future ”

28.02.2014

Linköping, Sweden



Prof. Vladimir N. Kestelman
Prof. Arne Jönsson
Prof. Sagat Junisbekov
Alexandr N. Shevtsov



НАТРАЖДАЕТСЯ

**СТРЕЛЬЦОВА
ИННА НИКОЛАЕВНА**

*За активное участие в V-й международной
научно-технической конференции
«Энергетика. Экология. Человек»
(конференция молодых ученых, аспирантов и магистрантов)*

Председатель
д.т.н., проф.,
директор ИЭЭ НТУУ «КПИ»



Денисюк С.П.

Зам. председателя
д.т.н., проф., зав. кафедрой ГС и ГТ
ИЭЭ НТУУ «КПИ»

Кравец В.Г.

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 101946

РІЗЕЦЬ КАВІТАЦІЙНИЙ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **12.10.2015.**

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

А.Г. Жарінова А.Г. Жарінова

